

ISSN 2079-3928

# Природо- пользование

к 90-летию

Института природопользования

НАН Беларусь



2  
2022

Государственное научное учреждение  
«Институт природопользования  
Национальной академии наук Беларуси»

# Природопользование

2022. № 2

Основан в 1996 г. как сборник научных трудов.  
В 2018 г. преобразован в журнал.  
Выходит 2 раза в год

**К 90-летию Института**

**Главный редактор**  
Лысенко С. А. – доктор физико-математических наук, профессор

**Редакционная коллегия**

Хомич В. С. – доктор географических наук, доцент (заместитель главного редактора)  
Томсон А. Э. – кандидат химических наук, доцент (заместитель главного редактора)  
Высоченко А. В. – кандидат технических наук (ответственный секретарь)  
Бровка Г. П. – доктор технических наук, доцент  
Грибик Я. Г. – кандидат геолого-минералогических наук, доцент  
Жогло В. Г. – доктор геолого-минералогических наук, доцент  
Какарека С. В. – доктор технических наук, профессор  
Камышенко Г. А. – кандидат технических наук, доцент  
Курзо Б. В. – доктор технических наук, доцент  
Кухарчик Т. И. – доктор географических наук, доцент  
Лиштван И. И. – академик, доктор технических наук, профессор  
Логинов В. Ф. – академик, доктор географических наук, профессор  
Матвеев А. В. – академик, доктор геолого-минералогических наук, профессор  
Струк М. И. – кандидат географических наук, доцент

**Международный редакционный совет**

Балтрунас В. – доктор наук (геология), профессор (Литва)  
Зюзин Б. Ф. – доктор технических наук, профессор (Россия)  
Клавинс М. – доктор наук (химия), профессор (Латвия)  
Маркс Л. – доктор наук (геология), профессор (Польша)  
Руденко Л. Г. – академик НАН Украины, доктор географических наук, профессор (Украина)  
Тишков А. А. – член-корреспондент РАН, доктор географических наук, профессор (Россия)  
Черепанский М. М. – доктор геолого-минералогических наук, профессор (Россия)

**Адрес**

Ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск  
Тел. +375 17 215-26-32, факс +375 17 215-24-13  
[info@nature-nas.by](mailto:info@nature-nas.by)  
<http://nature-nas.by/journal>



State Scientific Institution  
“Institute of Nature Management  
of the National Academy of Sciences of Belarus”

# Nature Management

---

2022. № 2

---

Was founded in 1996 as a proceeding.  
In 2018 was transformed into a journal.  
Periodicity is 2 issues per year

## To the 90th anniversary of the Institute

### Editor-in-Chief

**Sergey Lysenko** – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor

### Editorial Board

**Valery Khomich** – D. Sc. (Geography), Docent (*Associate Editor-in-Chief*)  
**Aleksey Tomson** – Ph. D. (Chemistry), Docent (*Associate Editor-in-Chief*)  
**Anna Vysochenko** – Ph. D. (Technical) (*Executive Secretary*)  
**Gennadiy Brovka** – D. Sc. (Technical), Docent  
**Yaroslav Gribik** – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Docent  
**Vasiliy Zhoglo** – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Docent  
**Sergey Kakareka** – D. Sc. (Technical), Professor  
**Halina Kamyshenka** – Ph. D. (Technical), Docent  
**Boris Kurzo** – D. Sc. (Technical), Docent  
**Tamara Kukharchyk** – D. Sc. (Geography), Docent  
**Ivan Lishtvan** – Academician, D. Sc. (Technical), Professor  
**Vladimir Loginov** – Academician, D. Sc. (Geography), Professor  
**Aleksey Matveev** – Academician, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor  
**Mikhail Struk** – Ph. D. (Geography), Docent

### International Editorial Council

**Valentinas Baltrunas** – D. Sc. (Geology), Professor (Lithuania)  
**Boris Zuzin** – D. Sc. (Technical), Professor (Russia)  
**Maris Klavins** – Dr. Habil. (Chemistry), Professor (Latvia)  
**Leshek Marks** – Dr. Habil. (Geology), Professor (Poland)  
**Leonid Rudenko** – Academician, D. Sc. (Geography) (Ukraine)  
**Arcadiy Tishkov** – Corresponding Member, D. Sc. (Geography) (Russia)  
**Mikhail Cherepanetskii** – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor (Russia)

### Address

10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus  
Phone: +375 17 215-26-32, fax: +375 17 215-24-13  
[info@nature-nas.by](mailto:info@nature-nas.by)  
<http://nature-nas.by/journal>



## СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

### **ИНСТИТУТУ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НАН БЕЛАРУСИ – 90: ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ** **THE INSTITUTE OF NATURE MANAGEMENT OF NAS OF BELARUS – 90: HISTORY OF DEVELOPMENT, RESULTS OF ACTIVITY**

<b>Лысенко С. А., Камышенко Г. А.</b> <i>Lysenko S. A., Kamyshenka H. A.</i>	К 90-летнему юбилею Института природопользования НАН Беларуси <i>To the 90th Anniversary of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus</i>	5
<b>Лиштван И. И., Бровка Г. П., Януга Ю. Г., Мурашко А. А., Дедюля И. В., Бровка А. Г., Дударчик В. М., Крайко В. М., Алейникова В. Н., Агутин К. А., Дорожок И. Н., Ануфриева Е. В.</b> <i>Lishtvan I. I., Brovka G. P., Yanuta Y. G., Murashko A. A., Dedyulya I. V., Brovka A. G., Dudarchik V. M., Kraiko V. M., Aleynikova V. N., Agutin K. A., Dorozhok I. N., Anufrieva E. V.</i>	Результаты и перспективы развития исследований в области геотехнологий природных дисперсных сред <i>Results and prospective of studies developments in the field of the geotechnologies of nature dispersive medias</i>	21
<b>Гайдукевич О. М., Курзо Б. В., Кунцевич В. Б., Кляуззе И. В., Макаренко Т. И., Ворона М. В., Татков А. Ю., Сорокин А. И., Агейчик И. В.</b> <i>Gaidukevich O. M., Kurzo B. V., Kuntsevich V. B., Klyauzze I. V., Makarenko T. I., Vorona M. V., Tatkov A. Yu., Sorokin A. I., Ageichik I. V.</i>	Результаты научных и прикладных исследований Института природопользования НАН Беларуси в области генезиса, оценки ресурсов, добычи и переработки торфа и сапропеля <i>The result of scientific and applied research of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus in the field of genesis, resource assessment, the extraction and processing of peat and sapropel</i>	33
<b>Грибик Я. Г., Гарецкий Р. Г., Гирин Р. Э.</b> <i>Gribik Ya. G., Garetsky R. G., Girin R. E.</i>	Значимые научные и прикладные результаты Института природопользования НАН Беларуси в области геотектоники, геофизики и нефтяной геологии <i>Significant scientific and applied results of Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus in the field of geotectonics, geophysics and petroleum geology</i>	53
<b>Кухарик Е. А., Матвеев А. В., Рылова Т. Б., Зерницкая В. П.</b> <i>Kukharik E. A., Matveyev A. V., Rylova T. B., Zernitskaya V. P.</i>	Основные результаты научных исследований Института природопользования НАН Беларуси в области современной геодинамики и палеогеографии кайнозоя <i>The main results of the scientific studies of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus in the area of modern geodynamics and paleogeography of the Cenozoic</i>	68
<b>ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ</b> <b>GEOGRAPHY. GEOECOLOGY</b>		
<b>Лысенко С. А., Зайко П. О.</b> <i>Lysenko S. A., Zaiko P. O.</i>	Повышение точности численных прогнозов погоды на территории Беларуси с использованием оперативных спутниковых данных <i>Improving the accuracy of numerical weather forecasts in Belarus using operational satellite data</i>	86
<b>Волчек А. А., Шешко Н. Н., Кухаревич М. Ф.</b> <i>Volchek A. A., Sheshko N. N., Kukharevich M. F.</i>	Оценка степени эвтрофирования водотоков с использованием спутниковой информации (на примере реки Припяти) <i>Evaluation of the degree of water current eutrophication using satellite information (by example of Pripyat river)</i>	99
<b>Хомич В. С., Парfenов В. В., Савченко С. В.</b> <i>Khomich V. S., Parfenov V. V., Savchenko S. V.</i>	Тренды загрязнения почв тяжелыми металлами и нефтепродуктами в городах Беларуси <i>Trends of Soil Contamination with Heavy Metals and oil products in the cities of Belarus</i>	112
<b>Михальчук Н. В., Брыль Е. А.</b> <i>Mikhaychuk M. V., Bryl A. A.</i>	Особенности накопления тяжелых металлов в растениях зоны влияния предприятий по переработке свинецсодержащих отходов <i>Features of heavy metal accumulation in plants of the zone of influence of enterprises processing lead-containing waste</i>	122
<b>Кухарчик Т. И., Какарека С. В., Козыренко М. И., Черняк В. Д., Крылович А. В.</b> <i>Kukharchyk T. I., Kakareka S. V., Kozyrenka M. I., Chernyuk V. D., Krylovich A. V.</i>	Стойкие органические загрязнители в Беларуси: источники, накопление, регулирование <i>Persistent organic pollutants in Belarus: sources, accumulation, regulation</i>	136

<b>Мальчикина А. В., Какарека С. В.</b> <i>Malchikhina A. V., Kakareka S. V.</i>	Информационно-методическая база для оценки непреднамеренных выбросов пентахлорбензола на территории Беларусь <i>The information and methodological base for assessing unintentional emissions of pentachlorobenzene on the territory of Belarus</i>	145
<b>Струк М. И., Живнач С. Г.</b> <i>Struk M. I., Zhivnach S. G.</i>	Приоритетные направления долгосрочного планирования природных экосистем пригородной территории Минска <i>Priority directions of long-term planning of natural ecosystems in the suburban area of Minsk</i>	157
<b>Яцухно В. М., Червань А. Н., Тишкович О. В.</b> <i>Yatsukhno V. M., Chervan A. N., Tishkovich O. V.</i>	Эколого-экономическое обоснование противоэрозионной территориальной организации агроландшафтов <i>Ecological and economic ground of the anti-erosion territorial organization of agricultural landscapes</i>	171
<b>Сосновская Н. Е., Ракович В. А., Красноберская О. Г.</b> <i>Sosnovskaya N. E., Rakovich V. A., Krasnoberskaya O. G.</i>	Влияние стабилизирующих добавок на влагоустойчивость и переход гуминовых веществ в водный раствор из гранулированных органоминеральных удобрений <i>The effect of stabilizing additives on the water resistance and transition humic substances in water solution from granulated organomineral fertilizers</i>	178

## ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

<b>Кухарик Е. А.</b> <i>Kukharik E. A.</i>	Развитие процессов биогенного седименто- и морфогенеза на территории Центральной Беларусь <i>The development of the processes of biogenic sediment- and morphogenesis on the territory of Central Belarus</i>	185
<b>Жогло В. Г.</b> <i>Zhoglo V. G.</i>	Численное моделирование взаимосвязи грунтовых и поверхностных вод (на примере Новодворского месторождения базальтов) <i>Numerical modeling of the relationship between ground and surface waters (on the example of the Novodvorskoye basalt deposit)</i>	195

## ЮБИЛЕИ JUBILEE

К 90-летию академика Ивана Ивановича Лиштвана <i>To the 90th anniversary of Academician Ivan Ivanovich Lishtvan</i>	213
О научной деятельности академика И. И. Лиштвана в период его работы в Калининском политехническом институте <i>On the scientific activity of Academician I. I. Lishtvan during his work at the Kalinin Polytechnic Institute</i>	216
Юбилей профессора Галины Васильевны Наумовой <i>Jubilee of Professor Galina Vasilyevna Naumova</i>	220
К 70-летию Валерия Степановича Хомича <i>To the 70th Anniversary of Valery Stepanovich Khomich</i>	223

## ПАМЯТИ УЧЕНОГО MEMORY OF A SCIENTIST

Член-корреспондент Ромма Ефимович Айзберг (1933–2022) <i>Corresponding Member Romma Efimovich Aizberg (1933–2022)</i>	225
Александр Кириллович Карабанов (1952–2019) К 70-летию со дня рождения <i>Alexander Kirillovich Karabanov (1952–2019) To the 70th of the birth</i>	227

## ХРОНИКА CHRONICS

Итоги IV Международной научно-практической конференции «Природная среда Антарктики: междисциплинарные подходы к изучению», посвященной 15-летию создания государственного учреждения «Республиканский центр полярных исследований» <i>Results of the IV International scientific and practical conference "The natural environment of Antarctica: cross-disciplinary study approaches" dedicated to the 15th of the State Institution "Republican Center for polar research"</i>	229
---	-----

## НОВИНКИ ЛИТЕРАТУРЫ NEW LITERATURE

232

**ИНСТИТУТУ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НАН БЕЛАРУСИ – 90:  
ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**  
**THE INSTITUTE OF NATURE MANAGEMENT OF NAS OF BELARUS – 90:  
HISTORY OF DEVELOPMENT, RESULTS OF ACTIVITY**

---

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-2-5-20>

УДК 001.891

Поступила в редакцию 12.08.2022

Received 12.08.2022

**К 90-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ ИНСТИТУТА ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ  
НАН БЕЛАРУСИ**

**С. А. Лысенко, Г. А. Камышенко**

*Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Статья посвящена 90-летию со дня основания государственного научного учреждения «Институт природопользования Национальной академии наук Беларусь». Приведены основные направления научной, научно-технической и инновационной деятельности Института, а также важнейшие научные результаты, полученные в последнее десятилетие, отражена практическая реализация созданных разработок. Представлена информация об участии в выполнении государственных программ разного типа, включая программы (подпрограммы), по которым Институт в настоящее время является головной организацией-исполнителем, обеспечивая контроль за эффективностью и результативностью их выполнения. Приведены сведения о научных школах, сформированных и развивающихся ведущими учеными Института, представлены научные специальности, по которым ведется подготовка кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре при Институте. Изложены ближайшие перспективы развития организации.

**Ключевые слова:** научные результаты; геология; геодинамика и палеогеография; гидрогеология; метеорология; климатология и агрометеорология; геоэкологические исследования; торф и сапропель; технологии.

**Для цитирования.** Лысенко С. А., Камышенко Г. А. К 90-летнему юбилею Института природопользования НАН Беларусь // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 5–20.

**TO THE 90th ANNIVERSARY OF THE INSTITUTE OF NATURE MANAGEMENT  
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS**

**S. A. Lysenko, H. A. Kamyshenka**

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** The article is devoted to the 90th anniversary of the founding of the state scientific institution "Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus". The main directions of scientific, scientific-technical and innovative activities of the Institute are given, as well as the most important scientific results obtained in the last decade, the practical implementation of the created developments is reflected. Information is provided on participation in the implementation of state programs of various types, including programs (subprograms), for which the Institute is currently the lead executing organization, ensuring control over the efficiency and effectiveness of their implementation. Information about the scientific schools formed and developed by the leading scientists of the Institute is given, scientific specialties are presented, in which highly qualified personnel are trained in postgraduate and doctoral studies at the Institute. The immediate prospects for the development of the organization are outlined.

**Keywords:** scientific results; geology; geodynamics and paleogeography; hydrogeology; meteorology; climatology and agrometeorology; geoecological research; peat and sapropel; technologies.

**For citation.** Lysenko S. A., Kamyshenka H. A. To the 90th anniversary of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 5–20.

**Введение.** В 2022 г. государственному научному учреждению «Институт природопользования Национальной академии наук Беларусь» исполняется 90 лет со дня основания. Институт образован на базе Института торфа АН БССР (создан в 1932 г.), преобразован в 1990 г. в Институт проблем использования природных ресурсов и экологии Академии наук БССР, в 2008 г. переименован в Институт природопользования НАН Беларусь (далее – Институт). В 2017 г. с целью научного обеспечения и

внедрения в производство полученных результатов научно-технической деятельности Институт реорганизован путем присоединения к нему республиканского унитарного предприятия «Экспериментальная база Свислочь» Национальной академии наук Беларусь в качестве обособленного структурного подразделения – филиала «Экспериментальная база Свислочь». Институт аккредитован в качестве научной организации в Государственном комитете по науке и технологиям Республики Беларусь и Национальной академии наук Беларуси.

В настоящее время Институт является единственным научным учреждением Национальной академии наук Беларуси, осуществляющим комплексные исследования в области природопользования и наук о Земле. Основными направлениями научной деятельности Института являются: разработка научных основ природопользования и охраны окружающей среды; оценка, прогнозирование и оптимизация антропогенных воздействий на природные комплексы; научное обоснование создания ресурсосберегающих технологий добычи и переработки твердых горючих ископаемых; изучение условий формирования и оценка состояния пресных питьевых и минеральных вод; изучение геодинамики земной коры и современных геологических процессов на территории Беларусь; геоэкологическое обоснование проектирования и размещения особо ответственных сооружений и экологоопасных объектов (АЭС, ГЭС, подземных хранилищ газа, мест захоронения высокотоксичных отходов и др.); диагностика состояния природной среды на основе использования современных аэрокосмических, наземных, телекоммуникационных и информационно-измерительных средств.

В Институте, реализующем значительную часть выполняемых в республике исследований в области наук о Земле, сосредоточен высококвалифицированный научный потенциал, основу которого составляют академики, доктора наук и многочисленные кандидаты наук. В структуру Института входят три центра (центр по торфу и сапропелям, центр геоэкологии и климатологии, центр литосфера и минерагении), объединяющие 10 научно-исследовательских лабораторий, отдел сопровождения научной деятельности и международного сотрудничества, филиал «Экспериментальная база Свислочь». Исследования ведутся в рамках научных школ, сформированных и развивающихся ведущими учеными, чьи достижения известны не только в Беларусь, но и далеко за ее пределами: школа физикохимии и физико-химической механики природных дисперсных систем (академик И. И. Лиштван), эколого-географическая научная школа (академик В. Ф. Логинов), геологическая научная школа (академик Р. Г. Гарецкий).

Функционирующие в Институте научные школы отличаются богатой историей и традициями, высоким профессиональным уровнем ученых, что позволяет решать крупные, научно значимые проблемы, осуществлять передачу накопленных знаний молодежи.

Институт природопользования НАН Беларусь является признанным мировым лидером в исследованиях торфа и сапропеля. Широкую известность получили работы ученых и специалистов школы физикохимии и физико-химической механики природных дисперсных систем по решению коллоидно-химических проблем экологии, охраны окружающей среды и природопользования. Исследователи внесли значительный вклад в решение актуальных проблем разработки технологий добычи и глубокой переработки твердых горючих ископаемых, создания технологических основ производства новых материалов и препаратов для использования в сельском хозяйстве, топливной энергетике, химико-технологическом, природоохранном, бальнеологическом и медицинском направлениях. По разработкам ученых Института построен Завод горного воска (г. Свислочь Пуховичского района Минской области), освоена технология и организовано производство жидких гуминовых удобрений с микроэлементами «ЭлеГум» (ОАО «Зеленоборское» Смолевичского района Минской области), создан цех по производству сапропелевых кормовых добавок (г. п. Лельчицы Гомельской области), организовано производство органоминеральных удобрений и регуляторов роста растений, сорбционных материалов и др. В настоящее время одним из приоритетных направлений исследований в области глубокой переработки торфа является получение активированных углей, предназначенных для решения проблем охраны окружающей среды.

В рамках эколого-географической научной школы решаются геоэкологические проблемы. Результаты исследований использованы при разработке Концепции Национальной климатической программы, научно-прикладного справочника по агроклиматическим ресурсам страны, при создании системы информирования пользователей о состоянии природной среды республики. Учеными школы достигнуты значимые результаты в исследовании урбанизированных территорий. Созданные научные разработки используются при корректировке генпланов городов, совершенствовании нормативной документации в области охраны окружающей среды. В области исследования трансграничного загрязнения выполнен ряд работ: по моделированию и прогнозированию воздействий атмосферных выпадений на экосистемы; изучению источников поступления и поведения в окружающей среде тяжелых металлов и стойких органических загрязнителей; ведутся научные исследования загрязнения наземных экосистем пластиком и микропластиком в зонах локальных источников воздействия и др. Обладая высокой научной значимостью, результаты геоэкологических исследований чрезвычайно важны для решения практических задач по разработке действенных мер по адаптации отраслей экономики к происходящим изменениям условий хозяйствования. Результаты используются для научного обеспечения международных природоохранных конвенций: Конвенции о трансграничном загрязнении

---

нии воздуха на большие расстояния, Рамочной конвенции ООН об изменении климата, Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях.

Геологической научной школе принадлежит существенная роль в решении таких проблем, как: поиск месторождений полезных ископаемых; прогноз опасных природных и техногенных явлений; сохранение окружающей среды, комфортной для жизнедеятельности населения. Учеными школы выполнена типизация земной коры структур юго-восточной части Беларуси в пределах восточной части Припятского прогиба и Лоевской седловины, проведены исследования по выявлению залежей традиционного и нетрадиционного углеводородного сырья в пределах Припятского прогиба, Подляйско-Брестской, Оршанской впадин. В области гидрогеологии получены новейшие данные по минеральным водам Беларуси. При активном участии специалистов геологической научной школы выполнен комплекс научно-исследовательских работ по выбору площадки для размещения Белорусской АЭС и оценке ее воздействия на окружающую среду, организации мониторинга состояния и проявления опасных геологических процессов.

Высокий уровень кадрового потенциала позволяет обеспечивать научное руководство аспирантами и соискателями, консультирование докторантов. В аспирантуре при Институте подготовка кадров высшей квалификации ведется по шести научным специальностям: 05.17.07 – химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ (технические науки); 25.02.10 – геотехнология (подземная, открытая и строительная) (технические науки); 25.03.13 – геэкология (географические науки, технические науки); 25.03.05 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (географические науки); 25.03.08 – метеорология, климатология, агрометеорология (географические науки); 25.01.01 – общая и региональная геология (геолого-минералогические науки). В 2016 г. состоялся первый прием на обучение в докторантuru по специальности 25.03.13 – геэкология (географические науки, технические науки).

При Институте действуют два специализированных совета по защите диссертаций: Совет Д 01.23.01 на получение ученой степени кандидата/доктора технических наук по специальностям 25.02.10 – геотехнология (подземная, открытая и строительная) и 25.03.13 – геэкология; Совет К 01.23.01 на получение ученой степени кандидата географических наук по специальностям 25.03.13 – геэкология; 25.03.05 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия; 25.03.08 – метеорология, климатология, агрометеорология.

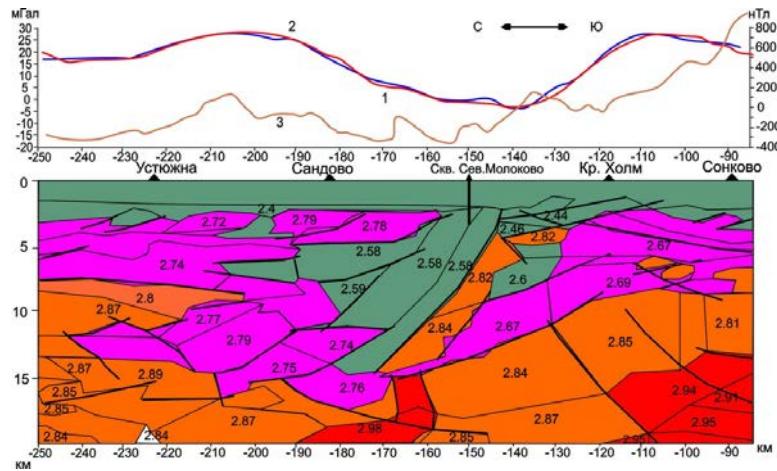
Институт традиционно осуществляет функции головной организации-исполнителя по ряду государственных программ разного типа, обеспечивая контроль за эффективностью и результативностью их реализации. В настоящее время Институт отвечает за выполнение: государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы и подпрограммы «Природные ресурсы и их рациональное использование», входящей в ее состав; подпрограммы 2 «Развитие деятельности белорусской антарктической станции» государственной программы (далее – ГП) «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларусь» на 2021–2025 годы; подпрограммы 4 «Инновационные продукты на основе минерального и органического сырья» ГП «Наукоемкие технологии и техника» на 2021–2025 годы; подпрограммы 3 «Устойчивое природопользование и инновационные технологии переработки, охраны и воспроизводства природных ресурсов» государственной научно-технической программы «Зеленые технологии ресурсопользования и экобезопасности» на 2021–2025 годы.

Кроме представленных выше программ (подпрограмм) Институт участвует в выполнении мероприятий в рамках ГП «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2021–2025 годы, проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, хозяйственных договоров, международных проектов и др.

За годы существования Института получен целый ряд значительных научных и практических результатов в области изучения природной среды Беларуси и ее компонентов, природопользования, недропользования и охраны окружающей среды, которые приводились ранее в обзорных статьях, посвященных юбилейным датам Института [1–7]. В представленной статье кратко перечислены важнейшие результаты, полученные в последнее десятилетие (2013–2022 гг.).

**Геология, геодинамика и палеогеография.** Выполнены фундаментальные геолого-геофизические исследования по геотектонике Беларуси и запада Восточно-Европейской платформы, выявлению закономерностей формирования минерагенического потенциала недр республики, мониторингу геомагнитного и гравитационных полей на территории Беларуси и в Антарктиде.

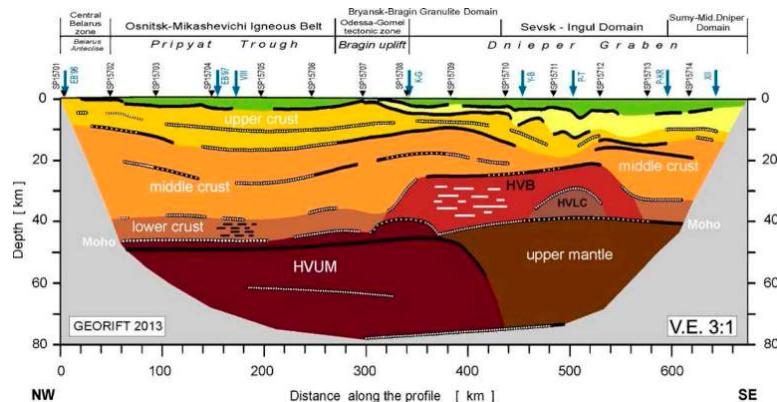
Разработана тектонофизическая модель (рис. 1), основанная на комплексном анализе экспериментальных геолого-геофизических материалов по геотрансекту глубинного сейсмического зондирования «Eurobridge-1», установлены закономерности глубинного строения земной коры и литосферы зоны сочленения Фенноскандии и Волго-Уралии (район Оршанской впадины) [8]. Результаты имеют большое теоретическое и прикладное значение для прогноза минерально-ресурсного потенциала страны и вошли в Топ-10 результатов деятельности ученых Академии за 2013 год в области фундаментальных и прикладных исследований.



**Рис. 1. Тектонофизическая модель земной коры зоны сочленения Фенноскандии и Волго-Урала вдоль геотрансекта ГСЗ ЕВ-1 (авторы: академик Р. Г. Гарецкий, доктор геолого-минералогических наук Г. И. Карапаев, член-корреспондент Р. Е. Айзберг)**

**Fig. 1. Tectonophysical model of the Earth's crust of the junction zone of Fennoscandia and Volga-Uralia along the EV-1 DSS geotransect (authors: D. Sc. R. G. Garetsky, D. Sc. G. I. Karataev, D. Sc. R. E. Aizberg)**

На основе геофизических исследований разработаны новые представления о палеогеодинамической эволюции глубинных зон земной коры и верхней мантии Припятского и Днепровского палеорифтовых бассейнов, наиболее глубоких структур рифтового типа в Европе (рис. 2) [9] (Топ-10 за 2018 год). Новые данные позволяют реконструировать палеогеодинамические условия формирования этих палеорифтовых структур, контролирующих размещение месторождений углеводородного сырья, калийных и каменных солей, углей и сланцев, промышленных рассолов и другого, что способствует повышению эффективности геологоразведочных работ.



**Рис. 2. Упрощенная структура литосферы вдоль профиля Георифт-2013 (авторы: член-корреспондент Р. Е. Айзберг, академик Р. Г. Гарецкий, кандидат геолого-минералогических наук Я. Г. Грибик, доктор геолого-минералогических наук Г. И. Карапаев)**

**Fig. 2. Simplified structure of the lithosphere along the Georift-2013 profile (authors: D. Sc. R. E. Aizberg, D. Sc. R. G. Garetsky, Ph. D. Y. G. Gribik, D. Sc. G. I. Karataev)**

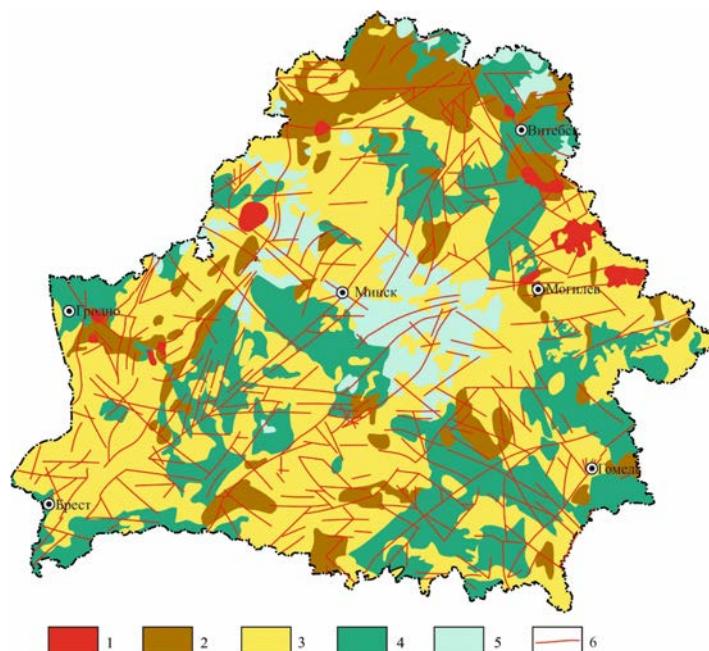
Разработана оригинальная прогнозная модель размещения традиционных, нетрадиционных и комбинированных залежей углеводородов применительно к межсолевому комплексу Припятского нефтегазоносного бассейна, которая является базовой основой нового направления геологоразведочных работ и добычи нефти и газа за счет вовлечения в разработку нетрадиционных и комбинированных залежей, приуроченных к полуколлекторам (микро- и наноколлекторам) [10]. Модель использована НПЦ по геологии Минприроды и РУП ПО «Белоруснефть» при выборе места заложения поисковых скважин на традиционные и нетрадиционные залежи углеводородов в Припятском прогибе.

В результате исследования особенностей минерагенического потенциала Подлясско-Брестской впадины по структурно-вещественным комплексам определены перспективы на углеводородное сырье.

рье, бурый уголь, фосфориты, янтарь, базальты, геотермальную энергию, пресные подземные воды с прогнозной временной оценкой их изучения и освоения.

Разработаны комплекс приборов и программное обеспечение для определения теплофизических и деформационно-прочностных характеристик горных пород для обоснования проектов проходки шахтных стволов с применением искусственного замораживания. Прикладная программа для расчета процесса замораживания горных пород Cryos 3D сертифицирована в Российской Федерации (2019 г.). Научно-изыскательские организации России проявляют значительный интерес к разработкам в данном направлении.

Изучение глубинного строения и динамики земной коры и литосферы Беларуси и смежных областей позволило: выявить особенности динамики и аномального проявления геофизических полей; установить источники поступления и концентрации радона в почвенном воздухе в зонах активных разломов и других геологических структур земной коры; определить обусловленные геологическим строением особенности влияния геофизических и газово-geoхимических аномалий на человека и биоту. Установлено, что значительная часть территории Беларуси является потенциально опасной по содержанию радона в почвенном воздухе (рис. 3). Сделан вывод о необходимости обязательного учета радона при исследовании медико-биологических последствий облучения от техногенных и природных источников [11, 12]. Схема радоновых аномалий в почвенном воздухе и схема районирования территории Беларуси по концентрациям радона в почвенном воздухе внедрены и используются Геофизической экспедицией ГП «НПЦ по геологии» Минприроды.



**Рис. 3. Районирование территории Беларуси по степени радоновой опасности:**  
**1 – потенциально радиоопасные территории; 2 – потенциально радиоопасные на отдельных площа-**  
**дях; 3 – потенциально радиоопасные на локальных участках; 4 – относительно радионебезопасные;**  
**5 – радионебезопасные; 6 – потенциально радиоопасные участки в зонах активных в четвертичное**  
**время разрывных нарушений (автор: академик А. В. Матвеев)**

**Fig. 3. Zoning of the territory of Belarus according to the degree of radon hazard:**  
**1 – potential radon hazardous territories; 2 – potential radon hazardous on separate areas; 3 – potential radon**  
**hazardous on local areas; 4 – relatively radon safe; 5 – radon safe; 6 – potential radon hazardous areas in ac-**  
**tive zones in the quaternary time of discontinuous contravention (the author: Academician A. V. Matveyev)**

Исследовано влияние процессов современной геодинамики на степень комфортности геологической среды для населения [13]. Разработаны и обоснованы критерии и выполнено районирование территории Белорусского Полесья по степени экологической безопасности (комфортности для жизнедеятельности населения).

В результате комплексных исследований позднеприморских и голоценовых отложений обоснована хроностратиграфическая схема расчленения отложений и прослежены этапы послеприморской эволюции осадконакопления. Разработана модель динамики климата и эволюции экосистем Европы (включая Беларусь) в постглациальное время (в течение последних 14,0 тыс. лет), позволяющая реконструировать палеогеографические условия в их хронологической последовательности и проводить корреляции событий с глобальными изменениями климата Земли. Результаты применения данной модели служат основой для создания синтетической картины временной и пространственной изменчивости климатических условий в континентальном и глобальном масштабах и вносят значительный вклад в развитие белорусской и европейской четвертичной палеогеографии и хроностратиграфии [14].

**Гидрогеология.** Разработана современная гидрогеологическая модель Оршанской впадины – наиболее крупного бассейна пресных и минеральных подземных вод на северо-востоке Беларуси. Оценены эксплуатационные запасы питьевых и минеральных вод, рекомендованы мероприятия по их охране от загрязнения и истощения. Разрабатываются долговременные прогнозы изменения качества подземных вод на участках размещения экологически опасных объектов. В частности, дано научное обоснование информационно-компьютерной системы управления состоянием подземных вод в зонах влияния экологоопасных объектов на территории Беларуси. Создана постоянно действующая численная модель фильтрации и миграции подземных вод зон активного и замедленного водообмена в районе влияния I–IV рудоуправлений ОАО «Беларуськалий», с использованием которой выполнено моделирование миграции NaCl в подземных водах (долгосрочный прогноз) при различных сценариях техногенного воздействия.

Впервые создана численная геофильтрационная модель зон активного и замедленного водообмена участка размещения Петриковского горно-обогатительного комбината, позволяющая оценивать водозащитные свойства надсолевой толщи над горными выработками. Воспроизведены водоносные горизонты и комплексы четвертичных, неогеновых, палеогеновых и меловых отложений зоны активного водообмена, а также сланценосная и гипсоносная подтолщи надсолевых отложений зоны замедленного водообмена (рис. 4). Модель перспективна для разработки прогнозных оценок ожидаемых водопритоков в горные выработки калийных шахт нового перспективного горнопромышленного региона.

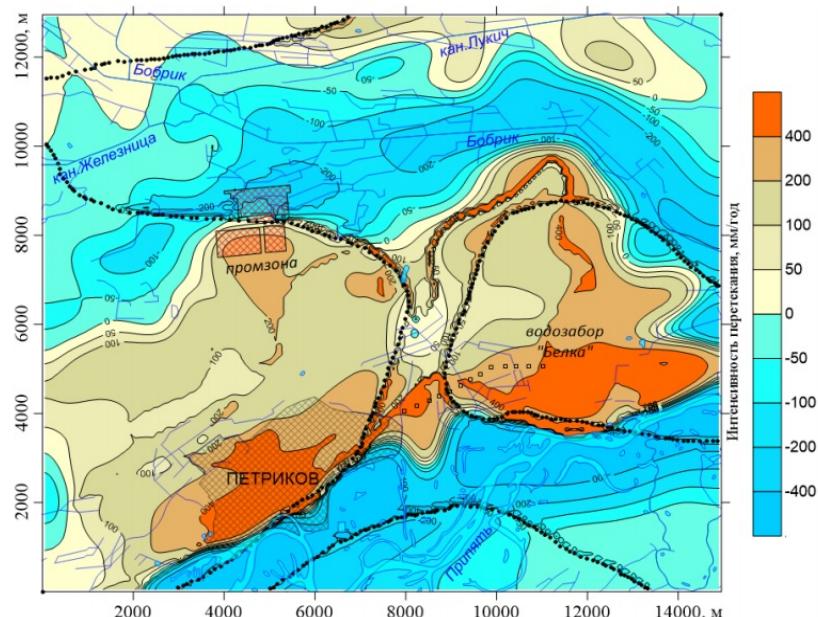


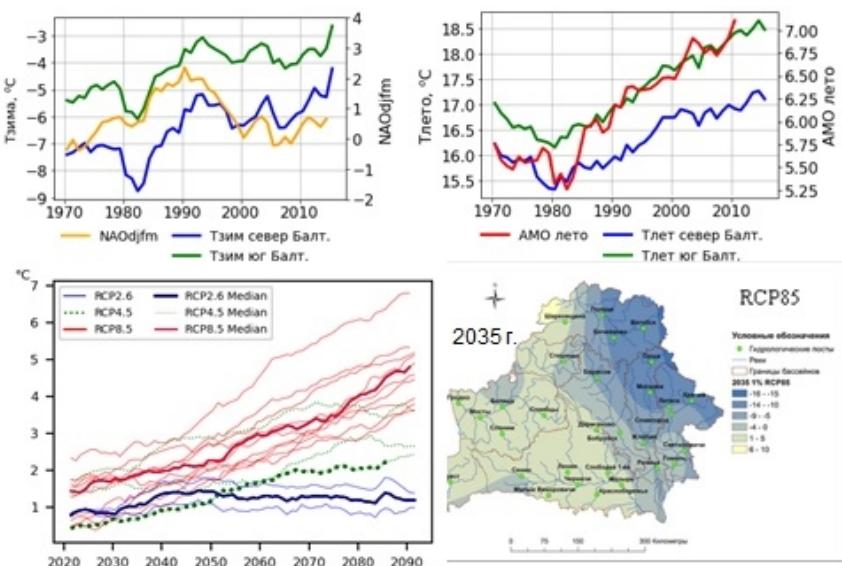
Рис. 4. Карта площадного питания и разгрузки подземных вод неоген-палеогенового водоносного комплекса (автор: доктор геолого-минералогических наук В. Г. Жогло)

Fig. 4. Map of areal recharge and groundwater discharge of the Neogene-Paleogene aquifer complex  
(author: D. Sc. V. G. Zhoglo)

**Метеорология, климатология и агрометеорология.** Выявлены сезонные особенности многолетних изменений глобального и регионального климата, установлены пространственно-временные закономерности проявления экстремальных погодных явлений, установлены квазикличность и противофазный характер изменения зимних и весенних среднесезонных суточных амплитуд температуры и др. [15–17].

Впервые разработан сеточный архив месячных данных по температуре воздуха и количеству осадков на территории Беларуси, оснащенный программным интерфейсом для статистического анализа и визуализации характеристик пространственно-временных распределений метеопараметров, позволяющий: автоматизировать и повышать точность вычисления статистических характеристик метеопараметров и их изменений на всей территории республики; сравнивать пространственные распределения метеопараметров для разных периодов; восстанавливать непрерывные временные ряды метеоданных для областей, административных районов и отдельных пунктов с заданными координатами. Разработка внедрена и используется Белгидрометом.

Получены модельные оценки влияния местного испарения на средние значения и долгопериодные изменения количества осадков в Беларуси и на территориях соседних государств, позволившие объяснить пространственно-временные особенности полей осадков на территории республики в вегетационный период. Установлены текущие и долгосрочные трансформации гидротермического режима в западной части Восточно-европейской равнины в связи с глобальными изменениями климата (рис. 5) [18] (Топ-10 за 2019 год).



**Рис. 5. Текущие и долгосрочные трансформации гидротермического режима в западной части Восточно-Европейской равнины в связи с глобальными изменениями климата (автор: кандидат географических наук И. С. Данилович)**

**Fig. 5. Current and long-term transformations of the hydrothermal regime in the western part of the East European Plain due to global climate change (author: Ph. D. I. S. Danilovich)**

Результаты комплексных исследований роли местного испарения и структуры землепользования на режим увлажненности территории Беларуси легли в основу Дорожной карты по осуществлению повторного заболачивания нарушенных торфяников и адаптации водных ресурсов Гомельской области к изменению климата, утвержденной Советом Министров Республики Беларусь 27 марта 2020 г.

Разработана методика оценки качества краткосрочных метеорологических прогнозов Белгидромета; создана, прошла государственную регистрацию (2020 г.) и используется в службе метеорологических прогнозов Белгидромета автоматизированная информационная система «Расчет оправдываемости и дополнительная оценка качества прогнозов погоды».

Оценено влияние изменения климата на фотосинтетическую компоненту биогенного стока углерода в наземных экосистемах Беларуси различного типа с использованием компьютерной программы (в виде автономного web-приложения), разработанной на основе выявленных эмпирических зависимостей биогенных потоков углерода, связанных с процессами фотосинтеза и респирации, от параметров окружающей среды – температуры воздуха и количества атмосферных осадков. Показано, что оптимум поглощения экосистемами углерода на всей территории Беларуси может быть пройден

уже в ближайшие 2–3 десятилетия, после чего выделение в атмосферу углерода в результате процессов дыхания растений и разложения органического вещества в почве станет превалировать над фотосинтетическим стоком углерода. В южных регионах Беларуси этот оптимум уже был пройден в 2012–2014 гг.

Разработана регионально-адаптируемая модель чистой первичной продуктивности растительного покрова для расчетов запасов углерода в наземных экосистемах и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур по данным наземных метеорологических наблюдений и спутниковых измерений вегетационного индекса подстилающей поверхности. Построенные на основе модели карты климатообусловленной составляющей долгопериодных изменений биопродуктивности для территории Беларуси переданы для использования ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды».

**Геоэкологические исследования.** Выполнены разделы «Стратегия развития ландшафтно-рекреационных территорий» и «Система регламентов использования ландшафтно-рекреационных зон», вошедшие в Генеральный план города Минска (корректировка), утвержденный Президентом Республики Беларусь в 2016 г.

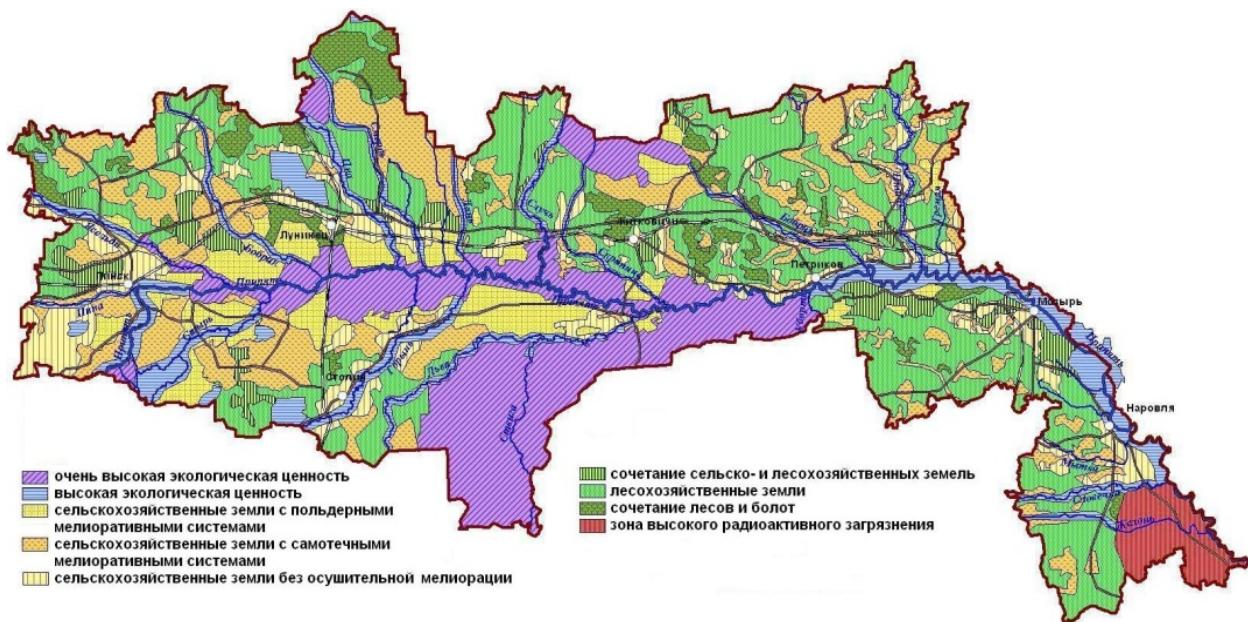
Разработано научное обоснование организации Схемы экологических коридоров города Минска, включающей систему взаимосвязанных наземных природных комплексов и водных экосистем, наиболее значимых для создания/поддержания благоприятных условий жизнедеятельности населения, а также режимы природопользования в пределах экологических коридоров и на прилегающих территориях и рекомендации по повышению эффективности выполнения ими экосистемных функций. Разработаны методические подходы к обоснованию и выделению природного каркаса города. Разработка реализована в виде Концептуальных схем природных каркасов г. Минска и его пригородной территории [19], использована при создании Схем экологического каркаса и экологических коридоров на территории г. Минска, внедрена в УП «Минскградо».

Разработан прогноз состояния окружающей среды Беларуси до 2035 г. Выявлены основные экологические угрозы в прогнозируемый период, обусловленные природными и техногенными факторами. Обоснованы пути и механизмы оптимизации экологической ситуации, повышения уровня экологической безопасности в регионе по мере его экономического развития, снижения рисков для населения, экономики и окружающей среды, обусловленных природными и техногенными факторами. На основании разработанного прогноза предложена Стратегия в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2035 года. Стратегия одобрена Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь и утверждена приказом от 24 декабря 2021 г. № 170-ОД в качестве нормативного правового документа. Разработаны предложения по совершенствованию Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь.

Выполнена оценка современного воздействия техногенного и природного характера на население, природные комплексы, земельные и водные ресурсы Припятского Полесья, а также разработано эколого-хозяйственное зонирование территории региона, отражающее оптимальную организацию природопользования в ее пределах (рис. 6).

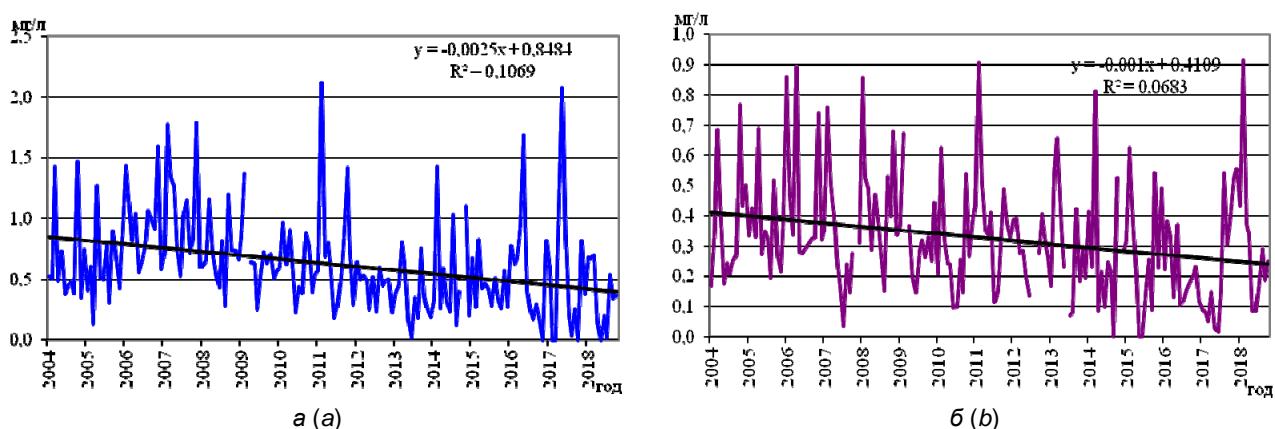
Разработана концепция развития потенциала р. Припять и прилегающих земель, предусматривающая рациональное использование транспортного и энергетического потенциала этой реки, улучшение водохозяйственного баланса региона, увеличение занятости населения на прилегающих территориях. Решением Совета Министров Республики Беларусь от 4 января 2019 г. № 37/222-932/191р Концепция направлена всем заинтересованным министерствам и ведомствам с указанием необходимости ее учета при подготовке (корректировке) государственных, региональных, отраслевых и других программ.

Выполнен анализ поступления различных загрязняющих веществ в окружающую среду с учетом локальных источников и трансграничного загрязнения. В частности, получены новые данные о трендах атмосферного поступления серы и азота (рис. 7) и потенциала закисления природной среды на территории г. Минска [20]. Впервые показано, что среднегодовые темпы сокращения содержания серы и окисленного азота в атмосферных осадках в г. Минске близки сокращениям содержания этих компонентов в осадках на фоновых станциях в Европе, в то же время темпы сокращения содержания восстановленного азота в осадках существенно более высокие (почти в 3 раза выше), что интерпретировано как результат преобладания локального и субрегионального поступления аммонийного азота над дальним переносом. Полученные результаты важны для прогноза воздействий атмосферных выпадений на природные системы города, в частности почвенный и растительный покров, водотоки и водоемы.



**Рис. 6. Экологово-хозяйственное зонирование территории Припятского Полесья (авторы: кандидат географических наук М. И. Струк, доктор географических наук В. С. Хомич, С. Г. Живнач и др.)**

**Fig. 6. Ecological and economic zoning of the territory of Pripyat Polissya (authors: Ph. D. M. I. Struk, D. Sc. V. S. Khomich, S. G. Zhivnach etc.)**



**Рис. 7. Многолетняя динамика содержания серы (а) и окисленного азота (б) в атмосферных осадках на территории г. Минска (авторы: доктор технических наук С. В. Какарека, кандидат географических наук Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич)**

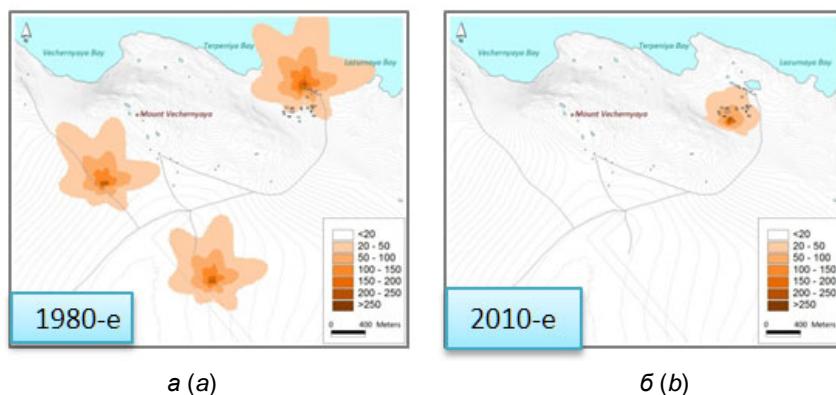
**Fig. 7. Long-term dynamics of the content of sulfur (a) and oxidized (b) nitrogen in atmospheric precipitation in the territory of Minsk (authors: D. Sc. S. V. Kakareka, Ph. D. Yu. G. Kokosh, M. A. Kudrevich)**

Разработаны методические рекомендации по выявлению и оценке запасов химических веществ, включенных и находящихся на рассмотрении для включения в Стокгольмскую конвенцию о стойких органических загрязнителях (СОЗ). Разработки в данном направлении необходимы для обеспечения выполнения обязательств Республики Беларусь по Стокгольмской конвенции о СОЗ.

Ежегодно готовятся и передаются Минприроды данные о выбросах загрязняющих веществ в атмосферу и информационный отчет для представления в Европейскую экономическую комиссию ООН, что обеспечивает выполнение Республикой Беларусь принятых международных обязательств по Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния.

Получены значимые результаты в области исследования Антарктиды. В результате выполненной комплексной оценки воздействия на атмосферный воздух выбросов стационарных и передвижных источников на территории Антарктиды (оазис Вечерний, Земля Эндерби) установлены тенденции

изменения уровня этого воздействия за последние 30 лет (рис. 8). Результаты исследований позволили разработать научно-информационные основы совершенствования методического обеспечения проведения оценки воздействия на окружающую среду в Антарктике (Топ-10 за 2020 год). Подготовлена и принята на международном уровне всесторонняя оценка окружающей среды «Строительство и функционирование Белорусской антарктической станции на горе Вечерняя, Земля Эндерби» как необходимое условие строительства в Антарктике Белорусской научной станции. Выполненные работы в данном направлении способствуют получению республикой статуса Консультативной Стороны Договора об Антарктике [21].



**Рис. 8. Численное моделирование распространения аэрозольно-газовых примесей в атмосфере Белорусской антарктической станции: а – 1980-е гг.; б – 2010-е гг.**  
(автор: доктор технических наук С. В. Какарека)

**Fig. 8. Numerical modeling of the propagation of aerosol-gas impurities in the atmosphere of the Belarusian Antarctic Station: a – 1980s; b – 2010s (author: D. Sc. S. V. Kakareka)**

**Исследования торфа и сапропеля, создание импортозамещающих материалов и препаратов.** Институт занимает лидирующие позиции в исследованиях торфа и сапропеля, решении актуальных проблем разработки технологий их добычи и глубокой комплексной переработки.

Разработана Схема рационального использования торфяных месторождений и охраны болот Республики Беларусь на период до 2030 года, утвержденная постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 30 декабря 2015 г. № 1111. Разработаны, утверждены в установленном законодательством Республики Беларусь порядке и переданы органам государственного управления технические нормативно-правовые акты по биосферно-совместимому использованию торфяных месторождений. Выполнена оценка современного состояния выработанных торфяных месторождений и направлений их использования. Ведутся работы по составлению электронного Атласа торфяных месторождений Республики Беларусь на основе анализа их современного состояния по данным дистанционного зондирования Земли. Аналитическая записка «Состояние торфяного фонда Брестской, Гомельской и Могилёвской областей Беларусь» передана для использования в ГП «Белгосгеоцентр» и ГПО «Белтопгаз» (2020 г.). Предложены критерии и выполнено районирование территории республики по объему и пригодности запасов торфа и сапропеля для выпуска продукции комплексного назначения, выявлены перспективы их применения в самых разных отраслях экономики [22].

Количественный анализ продуктов пиролиза твердых горючих ископаемых различных смесевых сочетаний позволил выявить синергически неаддитивно увеличенный выход смолы из их композиций по сравнению с исходными материалами, что открывает в перспективе возможность повышения выхода целевого продукта (смолы) из подобранных смесевых материалов. Предложен способ утилизации полимерных отходов пиролизом торфополимерных композиций, позволяющий получать фракцию смолы с более высоким выходом и пиролизный газ с существенно большей теплотой сгорания, что дает основание рассматривать их в качестве высокоэффективных энергоносителей при получении тепловой и электрической энергии [23, 24].

Разрабатываются новые материалы многофункционального назначения на основе гуминовых веществ твердых горючих ископаемых, активно внедряемые в производство. Предложена принципиальная базовая технологическая схема получения в рамках крупного опытно-промышленного цеха гуминовых препаратов (регуляторов роста растений, консервантов кормов, кормовых добавок) для

сельского хозяйства методами гидролиза и окисления торфа и разработан базовый опытно-промышленный технологический регламент на их производство.

Созданы композиционные составы новой кормовой добавки для использования в животноводстве, включающие основные компоненты (сфагновый торф, ростки солода, сухое молоко) и дополнительно – одно из связующих (декстрин, альбумин, сапропель). Предложен способ получения кормовой добавки в гранулированном виде, научно-хозяйственный опыт на поросятах-отъемышах выявил положительное воздействие кормовой добавки на рост и состояние животных [25]. Разработаны научные основы и способ термохимической деструкции торфа с получением феррогуматсодержащего препарата для профилактики анемии у сельскохозяйственных животных.

Разработан и внедрен в производство ЧПУП «ЧервеньАГРО» консервант зеленых кормов «Консил-УНИ», который получают методом химической деструкции торфа. Новый консервант включает комплекс природных биологически активных соединений, обладающих антиоксидантными и антимикробными свойствами: гуминовые кислоты, низкомолекулярные органические кислоты (муравьиная, уксусная, молочная и др.), фенолкарбоновые кислоты (салциловая, бензойная, оксибензойная, ванилиновая и др.), а также азотсодержащие минеральные добавки. Скармливание силоса, содержащего в своем составе биологически активные соединения торфа, оказывает положительное воздействие на обменные процессы в организме животных и усвоение питательных веществ рациона, способствует более высокому отложению азота, фосфора и кальция; повышает переваримость корма и среднесуточные приросты живой массы молодняка крупного рогатого скота, повышает молочную продуктивность коров.

Разработаны научные принципы и способ получения на основе химически модифицированных гуминовых веществ торфа комплексного жидкого удобрения «Тезоро», включающего наряду с основными элементами питания – азотом и калием, микроэлементы – бор, йод, молибден, и биологически активные гуминовые вещества – регуляторы роста растений [26]. Агрохимические испытания нового экологически безопасного удобрения показали высокую эффективность его применения на овощных и зеленых культурах (рис. 9). Гуматсодержащее удобрение «Тезоро» имеет перспективу импортозамещения и экспорта в страны ближнего и дальнего зарубежья.



Вариант	Урожайность, т/га	Прибавка к эталону		Вариант	Урожайность, т/га	Прибавка к эталону	
		т/га	%			т/га	%
Без внесения удобрений (контроль)	24	–	–	Без внесения удобрений (контроль)	21	–	–
Гумирост (эталон) 2,4 л/га	44	–	–	Гумирост (эталон) 2,6 л/га	34	–	–
Гуматсодержащее жидкое удобрение (испытуемое), 2,1 л/га	49	5	11	Гуматсодержащее удобрение Тезоро 2,4 л/га	36	2	6
НСР <sub>0,5</sub>	0,32			НСР <sub>0,5</sub>	0,28		

а (а)

б (б)

Рис. 9. Влияние гуматсодержащего удобрения с микроэлементами «Тезоро» на урожайность плодов огурца (а) и томата (б) в открытом грунте (авторы: доктор технических наук Г. В. Наумова, кандидат технических наук Н. А. Жмакова, кандидат технических наук Н. Л. Макарова, кандидат технических наук Т. Ф. Овчинникова)

Fig. 9. The effect of humate-containing fertilizer with microelements "Tezoro" on the yield of cucumber (a) and tomato (b) fruits in open ground (authors: D. Sc. G. V. Naumova, Ph. D. N. A. Zhmakova, Ph. D. N. L. Makarova, Ph. D. T. F. Ovchinnikova)

Обоснована и разработана комплексная безотходная технология получения гранулированного торфа как исходного сырья для производства торфяных активированных углей преимущественно мезопористой структуры, базирующаяся на формировании кускового торфа определенного диаметра при фрезеровании торфяной залежи с использованием модернизированного формующего аппарата машины КТД-1. В 2022 г. начато освоение технологии получения активированных углей из кускового торфа для решения проблем охраны окружающей среды.

В рамках инновационной деятельности в филиале «Экспериментальная база Свислочь» введена в строй экспериментальная пилотная установка и ведется освоение выпуска комплексных органоминеральных гранулированных удобрений пролонгированного действия на основе торфа и стандартных минеральных удобрений, производимых в Беларуси (рис. 10). Разработанные удобрения отличаются от ранее созданных способностью радикально снижать большие безвозвратные потери питательных веществ от вымывания атмосферными осадками из почвы и сохранять чистоту окружающей среды [27].



**Рис. 10. Экспериментальная пилотная установка по производству комплексных органоминеральных гранулированных удобрений пролонгированного действия на основе торфа, 2019 г.**

**Fig. 10. Experimental pilot plant for production complex organomineral granular fertilizers prolonged action based on peat, 2019**

По разработкам Института на предприятиях республики производится новая высокотехнологическая продукция на основе торфа и сапропеля для нужд природопользования и аграрного сектора экономики. Документально подтвержденный объем продукции, произведенной в период с 2016 по 2021 г., превысил 7,7 млн руб.

В представленной статье приведены отдельные значимые научные результаты, не исчерпывающие весь спектр достижений, полученных в последнее десятилетие.

На протяжении всех лет существования Институт отличается стабильной и эффективной деятельностью. За достижение наилучших результатов в научной, научно-технической и инновационной, производственной, социальной деятельности Институт природопользования НАН Беларуси неоднократно (по итогам 2013, 2014, 2017, 2018, 2021 г.) признавался победителем и был занесен на Доску почета Национальной академии наук Беларуси.

Научные достижения сотрудников Института отмечены рядом наград и премий.

Доктор географических наук В. С. Хомич, доктор технических наук С. В. Какарека, доктор географических наук Т. И. Кухарчик – лауреаты премии Национальной академии наук Беларуси 2013 года за цикл работ «Эколого-геохимические исследования трансформации природной среды на урбанизированных территориях и в импактных зонах под воздействием локальных и трансграничных источников опасных химических веществ».

Академик А. К. Карабанов за многолетнюю плодотворную работу, высокий профессионализм и неоценимый личный вклад в дело рационального природопользования и охраны окружающей среды награжден медалью Франциска Скорины (2018), нагрудным знаком Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь «Ганаровы эколаг» (2019).

Академик И. И. Лиштван и академик Р. Г. Гарецкий награждены нагрудным знаком «Залаты медаль Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі «За вялікі ўклад у развіццё науکі» за многолетнюю плодотворную научную и научно-организационную деятельность (2017, 2018).

Академику В. Ф. Логинову за многолетнюю плодотворную работу, высокий профессионализм, образцовое исполнение служебных обязанностей, заслуги в области науки присвоено Почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Беларусь» (2020), вручены нагрудные знаки «Залаты медаль Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі «За вялікі ўклад у развіццё науکі» (2020) и «Большая медаль Национальной академии наук Беларусь» (2022). В 2022 г. академик НАН Беларуси В. Ф. Логинов избран иностранным членом Российской академии наук по специальности «Климатология».

Академик А. В. Матвеев, член-корреспондент А. В. Кудельский, доктор технических наук С. В. Какарека награждены нагрудным знаком отличия имени В. М. Игнатовского Национальной академии наук Беларуси за значительный вклад в развитие научных исследований, подготовку кадров высшей квалификации (2019, 2022).

Кандидат технических наук Г. А. Камышенко за многолетнюю добросовестную работу, профессионализм, значительные достижения в научно-организационной деятельности награждена Почетной грамотой Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь (2018) и Почетной грамотой Администрации Президента Республики Беларусь (2021).

Кандидат химических наук А. Э. Томсон за многолетнюю плодотворную научную и научно-организационную деятельность, разработку и внедрение в производство высокоэффективных технологий создания новых композиционных сорбционных материалов на основе торфа награжден памятным знаком «У гонар 100-годдзя Інстытута беларускай культуры» (2022).

Доктор физико-математических наук С. А. Лысенко стал лауреатом конкурса 100 талантов Национальной академии наук Беларуси за 2019 год и включен в банк данных «100 талантов НАН Беларусь».

Ряд сотрудников стали лауреатами стипендии Президента Республики Беларусь, награждены памятными знаками «У гонар заснавання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» и «У гонар 90-годдзя Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі», Почетными грамотами НАН Беларуси и др.

**Заключение.** В соответствии с задачами инновационного развития страны научные исследования в Институте, выполняемые и планируемые к реализации в ближайшие годы, соответствуют приоритетному направлению научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы «3. Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование» (перечень утвержден Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156).

2025 г. будет завершающим для утвержденных на период 2021–2025 гг. государственных программ разного уровня, по которым Институт утвержден головной организацией-исполнителем, что влечет высокую ответственность по обеспечению их успешного выполнения.

Институт принимает участие в разработке концепции Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства «Обеспечение гидрометеорологической безопасности в условиях изменчивости и изменения климата» на 2023–2027 годы.

Ведется работа по формированию концепции Программы Союзного государства «Создание и валидация системы мониторинга углеродного баланса естественных и антропогенных экосистем России и Беларуси» (Карбон – СГ). От Российской стороны в разработке концепции указанной программы участвуют организации Министерства науки и высшего образования Российской Федерации – Российский государственный гидрометеорологический университет и Московский физико-технический институт.

На Институт возложены функции ответственного разработчика проекта концепции научно-технической программы Союзного государства «Геологоразведка и природопользование», начало реализации которой запланировано на 2023 г.

В соответствии с Соглашением о сотрудничестве в рамках подпрограммы международного научно-технического сотрудничества проекта науки и техники провинции Гуандун (Китай) Институтом заявлен проект, целью которого является разработка системы для мониторинга загрязнений поверхностных (наземных) вод на основе беспилотного летательного аппарата (организации-партнеры: Инженерно-геологический институт строительства провинции Гуандун, Гуандунский промышленный университет). Проект получил одобрение китайской стороны.

В октябре 2023 г. планируется проведение VI Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов» (совместно с Брестским государственным университетом имени А. С. Пушкина и Брестским государственным техническим университетом).

Дальнейшее развитие Института неразрывно связано с поступательным развитием научных школ и подготовкой кадров высшей квалификации, обеспечивающих преемственность поколений и способствующих решению важных для республики научно значимых проблем на высоком уровне.

### Список использованных источников

1. Белькевич, П. И. О некоторых итогах работы Института торфа (К 25-летию Института торфа АН БССР) / П. И. Белькевич, Е. А. Жук, М. В. Сапелкин // Труды Института торфа. – Минск, 1960. – Т. 9. – С. 3–18.
2. Институт торфа АН БССР. – Минск, 1983. – 160 с.
3. Институт проблем использования природных ресурсов и экологии Академии наук Беларуси. – Минск, 1992. – 24 с.
4. Сквозь годы в согласии с природой / НАН Беларуси. Институт проблем использования природных ресурсов и экологии. – Минск, 1998. – 136 с.
5. Лис, Л. С. Работы института последних 10 лет в области фундаментальных и прикладных исследований / Л. С. Лис // Природопользование. – Минск, 2002. – Вып. 8. – С. 4–12.
6. Изучение проблем природопользования – достижения и перспективы / В. Ф. Логинов [и др.] // Природопользование. – Минск, 2007. – Вып. 13. – С. 5–13.
7. Карабанов, А. К. Институт природопользования НАН Беларуси: основные результаты и перспективы исследований в области наук о Земле / А. К. Карабанов, Г. А. Камышенко // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. науок. – 2013. – № 1. – С. 5–17.
8. Гарецкий, Р. Г. Тектонофизическая модель шовной зоны Фенноскандии и Волго-Ураллии / Р. Г. Гарецкий, Г. И. Каратаев // Літасфера. – Мінск, 2014. – № 1 (40). – С. 88–101.
9. Айзберг, Р. Е. Особенности глубинного строения и синиритовой геодинамики Припятского и Днепровского сегментов земной коры / Р. Е. Айзберг, Я. Г. Грибик // Даклады Нац. акад. навук Беларусі. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 473–479.
10. Нетрадиционные источники углеводородного сырья в недрах Беларуси: геологические аспекты / Р. Е. Айзберг [и др.]; под общ. ред. Р. Е. Айзberга и Я. Г. Грибика. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 332 с.
11. Матвеев, А. В. Радон в геологических комплексах Беларуси / А. В. Матвеев, А. К. Карабанов, М. И. Автушко. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 136 с.
12. Автушко, М. И. Новые данные о поступлении радона в среду обитания человека / М. И. Автушко, А. В. Матвеев, С. А. Исаченко // Даклады Нац. акад. навук Беларусі. – 2021. – Т. 65, № 3. – С. 355–360.
13. Матвеев, А. В. Влияние процессов современной геодинамики на степень комфортности геологической среды для населения на территории восточной части Белорусского Полесья / А. В. Матвеев, В. П. Зерницкая // Вестник Брестского государственного университета. Сер. 5, Хімія, біялогія, науки аб Зямлі. – 2020. – № 1. – С. 94–104.
14. Зерницкая, В. П. Позднеледниковые и голоцен Беларуси: геохронология, осадконакопление, растительность и климат / В. П. Зерницкая. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 303 с.
15. Логинов, В. Ф. Изменения климата: тренды, циклы, паузы / В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий – Минск : Беларуская навука, 2017. – 179 с.
16. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 315 с.
17. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 1-е и 2-е изд. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
18. Danilovich, I. The Past and Future Estimates of Climate and Streamflow Changes in the Western Dvina River Basin / I. Danilovich, S. Zhurvalev, L. Kurochkina, P. Groisman // Frontiers in Earth Science, section Interdisciplinary Climate Studies. – 2019. – № 7 (204). – 18 р.
19. Струк, М. И. Бассейновые критерии организации природного каркаса пригородной территории Минска / М. И. Струк, С. Г. Живнach // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 63–75.
20. Какарека, С. В. Тренды содержания закисляющих и эвтрофирующих соединений в атмосферных осадках на урбанизированной территории / С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич // Даклады Нац. акад. навук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 6. – С. 724–733.
21. Научные исследования Беларуси в Антарктиде / В. Ф. Логинов [и др.]; под ред. акад. В. Ф. Логинова. – Минск : Беларуская навука, 2021. – 176 с.
22. Курзо, Б. В. Возможности совместного освоения месторождений торфа и сапропеля для целей сельского хозяйства в Беларуси / Б. В. Курзо, Т. И. Макаренко, О. М. Гайдукевич // Труды Института : науч. журн. – Тверь, 2019. – Вып. 19 (72). – С. 26–32.
23. Энергетехнологическое использование биомассы / И. И. Лиштван [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. науок. – 2016. – № 4. – С. 91–101.
24. Лиштван, И. И. Перспективы глубокой переработки твердых горючих ископаемых Беларуси / И. И. Лиштван, В. М. Дударчик, В. М. Крайко // Хімія твердого топлив. – 2017. – № 5. – С. 3–9.
25. Биологически активная кормовая добавка с сорбционными свойствами для поросят-отъемышей / А. Э. Томсон [и др.] // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 249–261.
26. Жидкое гуматсодержащее удобрение с микроэлементами «Тезоро» и эффективность его применения на культурах томата и огурца / Г. В. Наумова [и др.] // Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения : материалы Междунар. науч. экологич. конф., Краснодар, 29–31 марта 2021 г. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина. – С. 304–306.
27. Бамбалов, Н. Н. Новое поколение комплексных гранулированных органоминеральных удобрений пролонгированного действия / Н. Н. Бамбалов, Г. А. Соколов // Земледелие и растениеводство. – 2020. – № 4 (131). – С. 28–32.

## References

1. Belkevich P. I., Zhuk E. A., Sapelkin M. V. *O nekotoryh itogah raboty Instituta torfa (K 25-letiyu Instituta torfa AN BSSR)* [About some results of the Peat Institute (On the 25th anniversary of the Peat Institute of the Academy of Sciences of the BSSR)]. *Trudy Instituta torfa = Proceedings of the Peat Institute*. Minsk, 1960, vol. 9, pp. 3–18. (in Russian)
2. *Institut torfa AN BSSR* [Institute of Peat of the Academy of Sciences of the BSSR]. Minsk, 1983, 160 p. (in Russian)
3. *Institut problem ispol'zovaniya prirodnih resursov i ekologii Akademii nauk Belarusi* [Institute of Problems of Use of Natural Resources and Ecology of the Academy of Sciences of Belarus]. Minsk, 1992. 24 p. (in Russian)
4. *Skvoz' gody v soglasii s prirodoy* [Through the years in harmony with nature]. *NAS of Belarus. Institute of Problems of Use of Natural Resources and Ecology*, Minsk, 1998, 136 p. (in Russian)
5. Lis L. S. *Raboty instituta poslednih 10 let v oblasti fundamental'nyh i prikladnyh issledovanij* [The Institute's work over the past 10 years in the field of fundamental and applied research]. *Prirodopol'zovanie = Nature management*, Minsk, 2002, iss. 8, pp. 4–12. (in Russian)
6. Loginov V. F., Tomson A. E., Homich V. S., Kamyshenko G. A. *Izuchenie problem prirodopol'zovaniya – dostizheniya i perspektivy* [Study of environmental management problems – achievements and prospects]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, Minsk, 2007, iss. 13, pp. 5–13. (in Russian)
7. Karabanov A. K., Kamyshenko G. A. *Institut prirodopol'zovaniya NAN Belarusi: osnovnye rezul'taty i perspektivy issledovanij v oblasti nauk o Zemle* [Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus: main results and prospects of research in the field of Earth sciences]. *Vesti Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. himichnyh navuk*, 2013, no 1, pp. 5–17. (in Russian)
8. Gareckij R. G., Karataev G. I. *Tektonofizicheskaya model' shovnoj zony Fennoscandii i Volgo-Uralii* [Tectonophysical model of the suture zone of Fennoscandia and Volga-Ural]. *Litasfera = Lithosphere*, Minsk, 2014, no. 1 (40), pp. 88–101. (in Russian)
9. Ajzberg R. E., Gribik Ya. G. *Osobennosti glubinnogo stroeniya i sinriftovoj geodinamiki Pripyatskogo i Dneprovskogo segmentov zemnoj kory* [Features of the deep structure and synrift geodynamics of the Pripyat and Dnieper segments of the Earth's crust]. *Daklady Nac. akad. navuk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 473–479. (in Russian)
10. Ajzberg R. E., Gribik Ya. G., Beskopyl'nyj V. N., Nikulenko E. F. *Netradicionnye istochniki uglevodorodnogo syr'ya v nedrah Belarusi: geologicheskie aspekty* [Unconventional sources of hydrocarbon raw materials in the bowels of Belarus: geological aspects]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2022, 332 p. (in Russian)
11. Matveev A. V., Karabanov A. K., Avtushko M. I. *Radon v geologicheskikh kompleksah Belarusi* [Radon in geological complexes of Belarus]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, 136 p. (in Russian)
12. Avtushko M. I., Matveev A. V., Isachenko S. A. *Novye dannye o postuplenii radona v sredu obitaniya cheloveka* [New data on the entry of radon into the human environment]. *Daklady Nac. akad. navuk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 3, pp. 355–360. (in Russian)
13. Matveev A. V., Zernickaya V. P. *Vliyanie processov sovremennoj geodinamiki na stepen' komfortnosti geologicheskoy sredy dlya naseleniya na territorii vostochnoj chasti Belorusskogo Poles'ya* [Influence of the processes of modern geodynamics on the degree of comfort of the geological environment for the population on the territory of the eastern part of the Belarusian Polesye]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of Brest state University*, 2020, vol. 1, pp. 94–104. (in Russian)
14. Zernickaya V. P. *Pozdneledejnikov'e i golocen Belarusi: geohronologiya, osadkonakoplenie, rastitel'nost' i klimat* [Late Glacial and Holocene of Belarus: geochronology, sedimentation, vegetation and climate]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2022, 303 p. (in Russian)
15. Loginov V. F., Mikuckij V. S. *Izmeneniya klimata: trendy, cikly, pauzy* [Climate change: trends, cycles, pauses]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, 179 p. (in Russian)
16. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Sovremenneye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata* [Modern changes in the global and regional climate]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019, 315 p. (in Russian)
17. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, opportunities for regulation]. Minsk, Encyklopediks Publ., 2020, 264 p. (in Russian)
18. Danilovich I., Zhurvaley S., Kurochkina L., Groisman P. The Past and Future Estimates of Climate and Streamflow Changes in the Western Dvina River Basin. *Frontiers in Earth Science, section Interdisciplinary Climate Studies*, 2019, no. 7 (204), 18 p.
19. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Bassejnove kriterii organizacii prirodnogo karkasa prigorodnoj territorii Minska* [Basin criteria for the organization of the natural framework of the suburban territory of Minsk]. *Prirodopol'zovanie = Nature management*, Minsk, 2021, no. 1, pp. 63–75. (in Russian)
20. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. *Trendy soderzhaniya zakislyayushchih i evtrofiruyushchih soedinenij v atmosfernnyh osadkakh na urbanizirovannoj territorii* [Trends in the content of acidifying and eutrophying compounds in atmospheric precipitation in an urbanized area]. *Daklady Nac. akad. navuk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 6, pp. 724–733. (in Russian)
21. Loginov V. F. [et al.]. *Nauchnye issledovaniya Belarusi v Antarktide* [Scientific research of Belarus in Antarctica]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2021, 176 p. (in Russian)
22. Kurzo B. V., Makarenko T. I., Gajdukevich O. M. *Vozmozhnosti sovmestnogo osvoeniya mestorozhdenij torfa i sapropelya dlya celej sel'skogo hozyajstva v Belarusi* [Possibilities of joint development of peat and sapropel deposits for agricultural purposes in Belarus]. *Trudy Instorfa : nauchnyj zhurnal = Instorf's Works : scientific journal*. Tver', 2019, vol. 19 (72), pp. 26–32. (in Russian)
23. Lishtvan I. I., Dudarchik V. M., Krajko V. M., Anufrieva E. V., Smolyachkova E. A. *Energotekhnologicheskoe ispol'zovanie biomassy* [Energy technological use of biomass]. *Vesti Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. himichnyh navuk*, 2016, no. 4, pp. 91–101. (in Russian)

24. Lishtvan I. I., Dudarchik V. M., Krajko V. M. *Perspektivy glubokoj pererabotki tverdyh goryuchih iskopaemyh Belarusi* [Prospects for deep processing of solid fossil fuels in Belarus]. *Himiya tverdogo topliva = Solid Fuel Chemistry*, 2017, no. 5, pp. 3–9. (in Russian)
25. Tomson A. E. [et al.]. *Biologicheski aktivnaya kormovaya dobavka s sorpcionnymi svojstvami dlya porosyat-ot "emyshej* [Biologically active feed additive with sorption properties for weaning pigs]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2019, no. 1, pp. 249–261. (in Russian)
26. Naumova G. V. [et al.]. *Zhidkoe gumatsoderzhashchee udobrenie s mikroelementami "Tezoro" i effektivnost' ego primeneniya na kul'turah tomata i ogurca* [Liquid humate-containing fertilizer with trace elements "Tezoro" and the effectiveness of its application on tomato and cucumber crops]. *Materialy Mezhdunar. nauch. ekologich. konf. "Problemy transformacii estestvennyh landshaftov v rezul'tate antropogennoj deyatel'nosti i puti ih resheniya"* [Proc. of the Int. sci. and ecological conf. "Problems of transformation of natural landscapes as a result of anthropogenic activity and ways to solve them"]. Krasnodar, 2021, pp. 304–306. (in Russian)
27. Bambalov N. N., Sokolov G. A. *Novoe pokolenie kompleksnyh granulirovannyh organomineral'nyh udobrenij prolongirovannogo dejstviya* [New generation of complex granular organomineral fertilizers with prolonged action]. *Zemledelie i rastenievodstvo = Agriculture and plant growing*, 2020, no. 4 (131), pp. 28–32. (in Russian)

#### Информация об авторах

*Лысенко Сергей Александрович* – доктор физико-математических наук, профессор, директор, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

*Камышенко Галина Анатольевна* – кандидат технических наук, научный секретарь, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kamyshenka@tut.by

#### Information about the authors

Sergey A. Lysenko – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor, Director, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Halina A. Kamyshenka – Ph. D. (Technical), Scientific Secretary, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kamyshenka@tut.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-2-21-32>

УДК 504.054:54+504.06.631.438.556.306

Поступила в редакцию 18.10.2022

Received 18.10.2022

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ ПРИРОДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

**И. И. Лиштван, Г. П. Бровка, Ю. Г. Янuta, А. А. Мурашко, И. В. Дедюля,  
В. М. Дударчик, В. М. Крайко, А. Г. Бровка, В. Н. Алейникова,  
К. А. Агутин, И. Н. Дорожок, Е. В. Ануфриева**

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** В статье приведен обзор результатов по методам исследования характеристик тепло- и массопереноса при промерзании и моделировании замораживания горных пород. В направлении технологических разработок представлена установка для термохимической переработки горючих сланцев и других материалов методом пиролиза. Разработан способ утилизации полимерных отходов пиролизом торфополимерных композиций.

Проведены реологические исследования щелочных дисперсий торфа различного состава. Представлены результаты по изучению по коллоидно-химическим свойствам и содержанию функциональных групп гуминовых веществ торфа. Приведены результаты исследований по использованию золы от сжигания торфа и осадка систем мокрого обеспыливания в качестве сырья для производства новых материалов.

**Ключевые слова:** характеристики тепло- и массопереноса; замораживание горных пород; калориметрическая установка; морозное пучение; торф; торфяные месторождения; полимерсодержащие отходы; пиролиз; смола; пиролизный газ; теплота сгорания; термическая переработка; выщелачивание сорбируемых соединений; реологические свойства.

**Для цитирования.** Лиштван И. И., Бровка Г. П., Янuta Ю. Г., Мурашко А. А., Дедюля И. В., Дударчик В. М., Крайко В. М., Бровка А. Г., Алейникова В. Н., Агутин К. А., Дорожок И. Н., Ануфриева Е. В. Результаты и перспективы развития исследований в области геотехнологий природных дисперсных сред // Природопользование. – 2022.– № 2. – С. 21–32.

## RESULTS AND PROSPECTIVE OF STUDIES DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF THE GEOTECHNOLOGIES OF NATURE DISPERSIVE MEDIAS

**I. I. Lishtvan, G. P. Brovka, Y. G. Yanuta, A. A. Murashko, I. V. Dedyulya,  
U. M. Dudarchik, V. M. Kraiko, A. G. Brovka, V. N. Aleinikova, K. A. Agutin,  
I. N. Dorozhok, A. E. Anyfrieva**

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** The review of the results according to the research methods of the characteristics of heat and mass transfer during rocks freezing and the modelling of rocks is given in the article. In the direction of technological developments the plant for thermochemical proceeding of combustible shale and other materials by the pyrolysis method is represented. The way of utilization of polymeric wastes by the pyrolysis of peat and polymeric compositions is proposed.

The rheological research of leaching disperses of peat of different content are held. It is revealed that the degree of decomposition has the greatest impact to all rheological parameters of peat and leaching suspensions. The content of humic substances, ash elements, and also non-hydrolyzed substances in it has stronger influence on the structure durability of peat disperses. The results on the study on colloidal and chemical features and the content of functional groups of humic peat substance are given. The research results on the use of ash from peat burning and the sediment of the systems of wet dedusting as raw for new materials production.

**Keywords:** characteristics of heat and mass transfer; rocks freezing; calorimetric plant; freezing heaving; peat; peat deposits; polymer containing wastes; pyrolysis; resin; pyrolysis gas; burning heat; thermal proceeding; leaching of sorbent conjugations; rheological features.

**For citation.** Lishtvan I. I., Brovka G. P., Yanuta Y. G., Murashko, A. A., Dedyulya I. V., Dudarchik U. M., Kraiko V. M., Brovka A. G., Aleinikova V. N., Agutin K. A., Dorozhok I. N., Anyfrieva A. U. Results and prospective of studies developments in the field of the geotechnologies of nature dispersive medias. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 21–32.

Лаборатория физико-химической механики природных дисперсных систем была организована в 1973 г. по инициативе И. И. Лиштвана, который являлся ее руководителем до 2008 г. В настоящее время научные исследования лаборатории проводятся по следующим направлениям: массовлагоперенос и изучение свойств природных дисперсных материалов при отрицательных температурах; термохимическая переработка твердых горючих ископаемых, а также их композиций с полимерными материалами и получением экологобезопасных смесевых топлив; изучение реологических свойств композиций на основе каустобиолитов; исследование коллоидно-химических и сорбционных свойств гуминовых веществ и переработка отходов производства. В лаборатории проводятся исследования по разработке способов и приемов утилизации полимерсодержащих отходов, которые могут быть применимы для Беларуси с учетом складывающейся структуры ее отходов, получения из них эффективных энергоносителей и сорбентов путем создания в перспективе относительно дешевых, возможно, мобильных термоустановок по их переработке. За последние 10 лет сотрудники лаборатории участвовали в выполнении ряда исследовательских заданий по программам ГПНИ и ГНТП, отдельным проектам и прямым договорам с различными производственными и проектными учреждениями. Основные результаты данных исследований изложены ниже.

**Разработка и усовершенствование приборов и методов исследования.** Исследования в области изучения тепловых эффектов при фазовых переходах сложных природных и техногенных систем были положены в основу разработки оригинальной калориметрической установки [1], которая в настоящее время используется для исследования температуры начала замерзания и фазового состава воды в мерзлых горных породах. Данные исследования не только позволяют получить информацию для развития теоретических основ массопереноса, но и востребованы практикой: полученная информация использована для обоснования проектов проходки шахтных стволов калийных рудников с применением искусственного замораживания, а также в исследованиях горных пород в проекте подпрограммы «Развитие деятельности белорусской антарктической станции».

С целью более полной автоматизации поддержания оптимального температурного режима калориметрической установки и повышения точности и достоверности получаемых данных усовершенствовано приборное и программное обеспечение калориметрической установки.

Усовершенствованная калориметрическая установка представлена на рис. 1. Измерение и регулирование температуры рабочей камеры калориметрической установки осуществляется с помощью четырехканального компьютерного порта В-381Б разработки УП «УНИТЕХПРОМ БГУ» 9, в состав которого входят предусилитель, цифро-аналоговые преобразователи / аналого-цифровые преобразователи (АЦП/ЦАП).

В процессе опытов компьютерная система периодически с интервалом в 100 с ведет регистрацию данных и графически визуализирует текущее состояние процесса на мониторе. Для обработки полученных в процессе опыта данных в прикладной программе предусмотрен специальный модуль, позволяющий рассчитать на основании теплового баланса значения количества незамерзшей воды в исследуемом образце при различных значениях температуры.

**Установка для исследования морозного пучения.** Практика исследований процессов морозного пучения мерзлых грунтов показала, что в определенных ситуациях возникает необходимость оценки морозного пучения в закрытых системах, например, при обосновании проектов заморозки горных пород для проходки шахтных стволов в сложных гидрологических условиях. При этом внутри цилиндрического контура заморозки образуется закрытая система, внутри которой может создаваться напряженно-деформационное состояние за счет фазовых переходов воды в лед в замораживаемой горной породе и перераспределения влаги в замкнутом объеме контура замораживания. Кроме этих факторов следует учитывать возможную усадку непромерзшей породы, которая в различных горных породах будет зависеть от степени деформации скелета породы. Для глинистых пород с легкодеформируемым скелетом усадка непромерзшей зоны будет близка к количеству переместившейся влаги из талой в мерзлую породу. Для песчаных пород с жестким скелетом, напротив, независимо от количества переместившейся влаги усадка непромерзшей зоны будет близка к нулю.

С учетом изложенных факторов создана лабораторная установка, предназначенная для исследования процессов морозного пучения при промерзании влажных грунтов в закрытой системе. Особенностью данной установки является возможность испытаний либо одновременно трех идентичных образцов грунта, что обеспечивает наибольшую достоверность получаемых данных, либо трех образцов различного состава для сравнительного экспресс-анализа тенденции развития пучения.

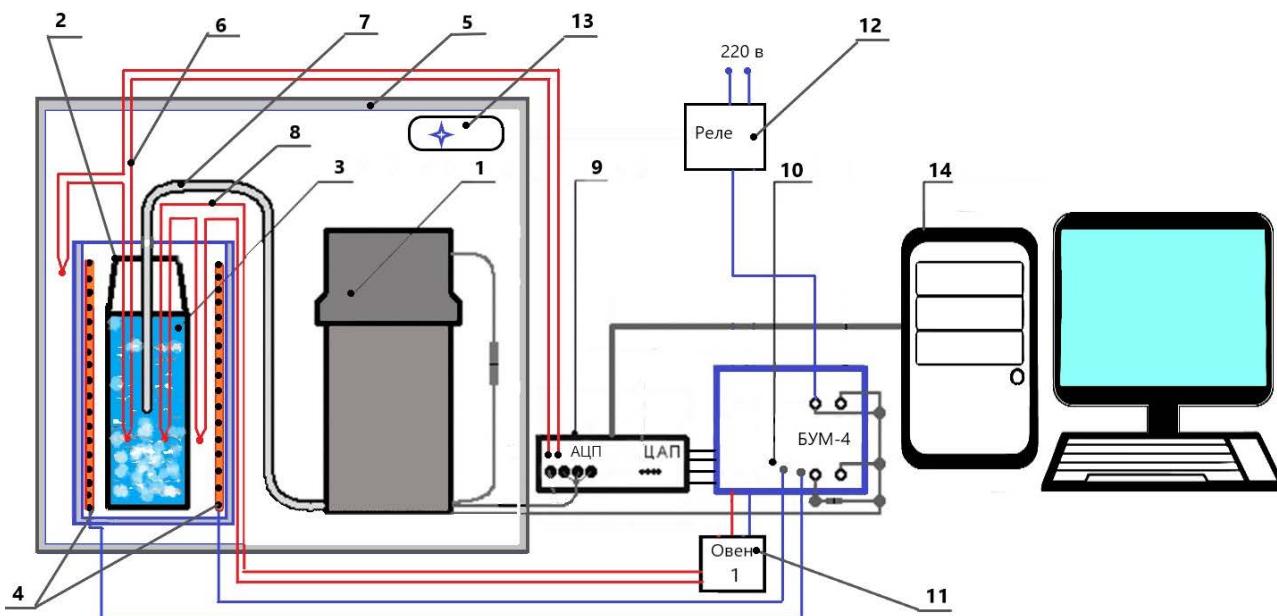


Рис. 1. Схема калориметрической установки:

1 – калориметрическая камера; 2 – ноль-термостат; 3 – сосуд Дьюара со смесью воды и льда; 4 – нагреватель ноль-термостата; 5 – холодильная камера; 6 – термопара холодильной камеры; 7 – нулевые спай батареи термопар корпуса калориметрической камеры; 8 – термопара ноль-термостата; 9 – 4-канальный компьютерный порт с АЦП и ЦАП; 10 – 4-канальный усилитель мощности БУМ-4; 11 – измеритель регулятор температуры Овен-1; 12 – реле включения компрессора холодильной камеры; 13 – компрессор холодильной камеры с вентилятором; 14 – персональный компьютер PC AT

Fig. 1. The system of calorimetric plant:

1 – calorimetric camera; 2 – zero-thermostat; 3 – Dewar vessel with water and ice mixture; 4 – heating of zero-thermostat; 5 – freezing camera; 6 – thermocouple of freezing camera; 7 – zero junctions of the battery of thermocouples of the body of the calorimetric chamber; 8 – thermocouple of zero-thermostat; 9 – 4-canonical computer port with ADC and DAC; 10 – 4-canonical power amplifier BUM-4; 11 – temperature controller regulator Aries-1; 12 – refrigerating chamber compressor relay; 13 – refrigerator compressor with a fan; 14 – personal computer PC AT

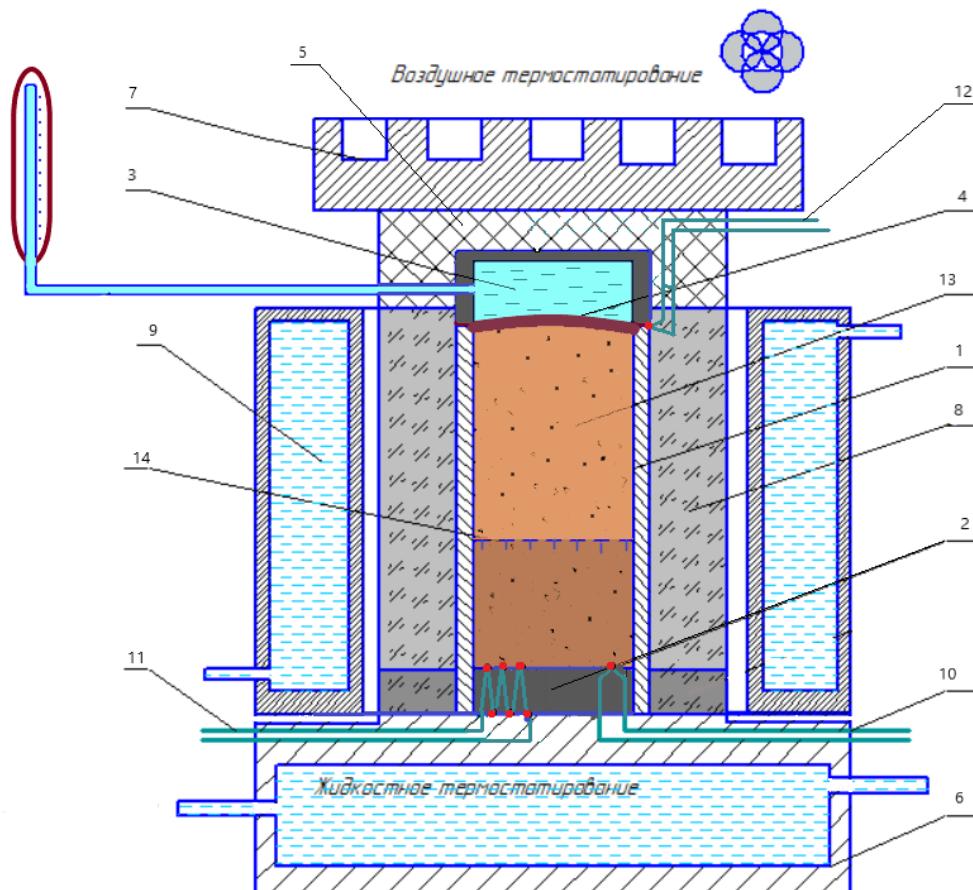
На рис. 2 схематично показана разработанная установка с одной цилиндрической кассетой 1с внутренним диаметром 50 мм и высотой 100 мм.

Кассеты устанавливаются на нижний теплоизоляционный слой 2 из эбонита толщиной 20 мм. Каждая кассета с образцом грунта оснащена демпферным герметичным стаканом 3 с эластичной мембраной 4, имеющей возможность свободного деформирования в процессе промораживания исследуемого образца. Стаканы с мембранный заполнены химически нейтральной незамерзающей жидкостью и через отводные рукава малого диаметра соединены с мерными емкостями, фиксирующими изменение объема жидкости в стакане в процессе морозного пучения грунта. Сверху демпферные стаканы погружены в теплоизоляционный слой из пенополистирола 5. Кассеты через указанные теплоизоляционные слои контактируют с теплообменниками. При этом нижний теплообменник 6 является жидкостным и терmostатируется с помощью криостата, а верхний теплообменник 7 является воздушным и терmostатируется воздушным потоком комнатной температуры. От внешней среды вся конструкция изолирована кожухом низкой теплопроводности из пенополистирола 8 и боковым терmostатированием 9.

Для контроля температурного режима промораживания образцов используются температурные датчики 10–12. С помощью датчиков 10 и 12 контролируется температура нижнего и верхнего торцов образца соответственно. Батарея термопар 11 используется для контроля градиента температуры в нижнем теплоизоляционном слое.

С учетом того, что верхний слой изоляции из пенопласта толщиной порядка 10 мм имеет коэффициент теплопроводности 0,05 Вт/(м K), а нижний слой – толщину 20 мм и коэффициент теплопроводности 0,15 Вт/(м K), при вариации коэффициента теплопроводности грунта в пределах 1–3 Вт/(м K) равновесное положение границы промерзания будет находиться в области демпферного стакана с вариацией не более 0,2 см. Это обеспечивает минимальный градиент температуры в непромерзшей зоне в процессе промерзания образца до половины его высоты. Разработанная методика позволяет вести промораживание образца с достаточно медленной скоростью, при которой влагосодержание в талой

зоне образца успевает равномерно распределиться по высоте. На основании этого условия получены расчетные формулы для определения коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны  $K_m$  на различных стадиях промораживания, в которых непрерывно происходит изменение влагосодержания талой зоны за счет переноса в мерзлую и ограниченного притока влаги. Такой режим промораживания дает возможность из одного опыта получить значения  $K_m$  при различных значениях влагосодержания талой зоны на границе с фронтом промерзания.



**Рис. 2. Лабораторная установка для исследования морозного пучения дисперсных грунтов в закрытой системе:** 1 – цилиндрическая кассета из эbonита; 2 – нижний теплоизоляционный слой; 3 – демпферный стакан с мерной емкостью и эластичной мембраной 4; 5 – верхний теплоизоляционный слой; 6 – нижний жидкостный теплообменник; 7 – верхний воздушный теплообменник; 8 – боковая теплоизоляция из пенополистирола; 9 – боковое жидкостное термостатирование; 10 – термопара для измерения температуры нижней части образца; 11 – батарея термопар для измерения перепада температуры в нижнем теплоизолирующем слое; 12 – термопара для измерения температуры верхней части образца; 13 – исследуемый образец; 14 – фронт промерзания

**Fig. 2. Laboratory plant for the studying of the freezing heaving of disperse grounds in close system:** 1 – ebonite cylindrical cassette; 2 – low heat-insulating layer; 3 – damper cup with measuring container and elastic membrane 4; 5 – top thermal insulation layer; 6 – lower liquid heat exchanger; 7 – upper air heat exchanger; 8 – lateral thermal insulation made of expanded polystyrene; 9 – lateral liquid temperature control; 10 – thermocouple for the measuring of the temperature of the lower part of the sample; 11 – battery of thermocouples for the measuring of the temperature difference in the lower heat-insulating layer; 12 – thermocouple for the measuring of the temperature of the upper part of the sample; 13 – test sample; 14 – freezing front

**Прикладная программа Cryos 3D.** Для обеспечения моделирования и визуализации процессов теплообмена в формате 3D при замораживании горных пород трубчатыми теплообменниками при проходке шахтных стволов с применением искусственного замораживания разработана прикладная программа Cryos 3D [2], которая позволяет рассчитывать и визуализировать процессы промерзания и оттаивания грунтов в формате 3D при замораживании их вертикальными трубчатыми теплообменниками, распределенными в расчетной области в произвольно заданном порядке. При этом условия на теплообменниках

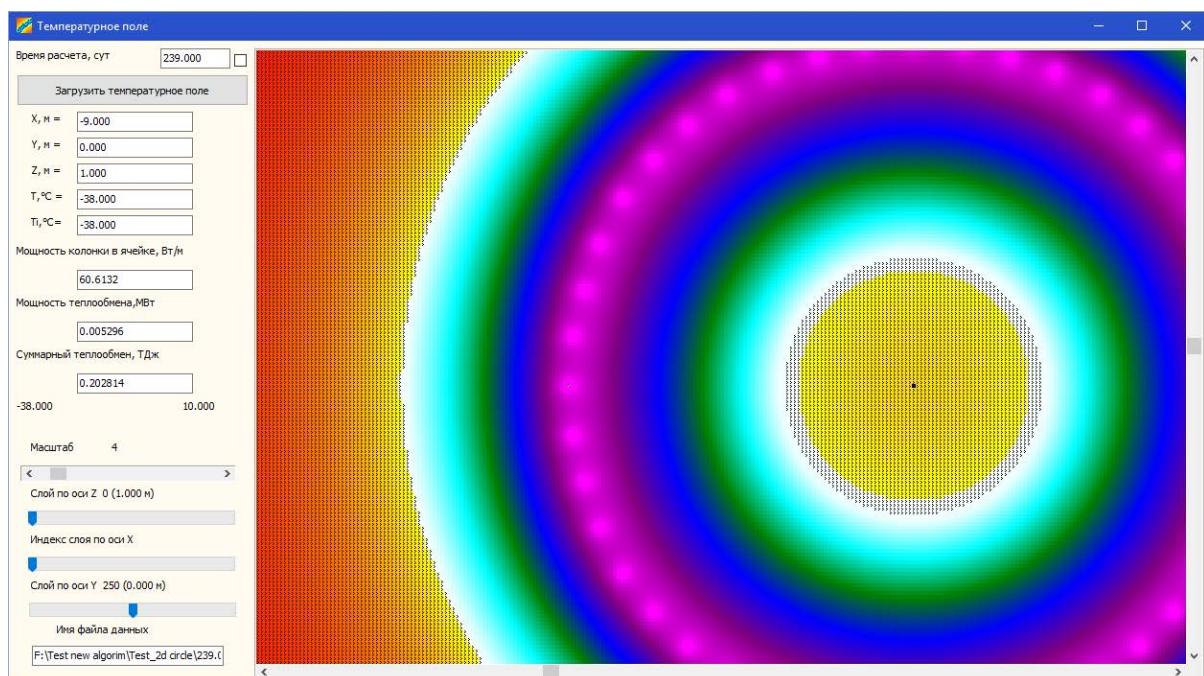
могут соответствовать граничным условиям I или III рода. Наряду с расчетом температурного поля рассчитываются и выводятся на монитор тепловые потоки, интегрированные по скважинам, и интегральное количество теплоты с начала момента заморозки теплообменников.

Программа написана на языке Delphi с использованием Embarcadero RAD Studio XE.

Системные требования к программе 3D: 64-разрядная операционная система (Windows версии 7.0 и выше), ОЗУ – не менее 16,00 ГБ, процессор – 3,40 ГГц.

Базовым типом исходных данных для программы 3D (далее – программный модуль) является xls-файл, в полях которого перечислены физические характеристики слоев, образующих горный массив. Дополнительным типом исходных данных для программного модуля являются следующие параметры: число узлов прямоугольного участка горного массива пород по осям координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соответственно; шаги по осям  $X$  и  $Y$  (но не по  $Z$ ); количество охлаждающих колонок и, соответственно, радиус их кольца; радиус трубы колонки и температура охлаждающего раствора; начальные температуры горного массива на верней и нижней границах соответственно.

Результаты вычислений доступны для анализа в графическом цветовом формате. Послойно выводятся координаты точки и ее текущая температура на расчетный момент времени для любого сечения вдоль главных осей. Для визуализации полученных результатов используется дополнительное окно программного модуля путем нажатия кнопки «Температурное поле». Результатом этого действия служит появление окна графической визуализации программного модуля (рис. 3).



**Рис. 3. Окно прикладной программы с визуализацией результата расчета – горизонтальный разрез замораживаемого массива горных пород**

**Fig. 3. The window of an applied program with calculation result visualization – horizontal section of frozen rock mass**

Предварительные расчеты показали, что для адекватного расчета температурного режима на Нивенском участке, характеризующимся неоднородностью горного массива и сравнительно большой глубиной замораживания (до 750 м), необходимо загружать исходные данные по 20–30 слоям, отличающимся по теплофизическим характеристикам, с шагом по вертикальной координате не более 5 м. При этом горный массив должен иметь размер  $50 \times 50$  м<sup>2</sup> в горизонтальном направлении. С учетом того, что шаг сетки в горизонтальном направлении составляет 0,1 м, а в вертикальном направлении – 5 м, для численного расчета формируется сетка  $500 \times 500 \times 150$ , т. е. 37 500 000 узлов.

Работу программы тестировали на модельных объектах массивов горных пород. При тестировании данного программного модуля использовали эталонное решение нелинейного уравнения теплопроводности для полуограниченной среды с однородными начальными условиями. Тестирование с использованием алгоритма коррекции пошагового изменения температуры на основании соблюдения

теплового баланса показало удовлетворительное соответствие результатов тестируемого и эталонного методов.

С помощью разработанной программы выполнили демонстрационные расчеты для заморозки ледопородного ограждения (ЛПО) шахтных стволов Гарлыкского калийного рудника в Туркменистане в 2015 г. Программа рекомендована научно-техническим советом концерна «Белнефтехим» (Беларусь) для использования при расчетах заморозки ЛПО калийных рудников. Выполнены также обосновывающие расчеты заморозки ЛПО на Нежинском месторождении калийных солей объекта СООО «Славкалий» и по объекту «Нивенский» в Калининградской области России. Программа Сгус 3D сертифицирована в Российской Федерации (сертификат соответствия № 0618530).

**Термохимическая переработка твердых горючих ископаемых.** Одним из направлений исследований в лаборатории является разработка способов и приемов утилизации полимерсодержащих отходов, которые могут быть применимы для Беларуси с учетом структуры полимерсодержащих отходов, образующихся на ее территории. Данные исследования преследуют цель получения из них эффективных энергоносителей и сорбентов путем создания в перспективе относительно дешевых, возможно, мобильных термоустановок по их переработке.

Перспективным направлением переработки отходов полимеров является их пиролиз – процесс термического разложения, проводимый в отсутствие кислорода и приводящий к образованию газообразных, жидких и твердых продуктов – углеродных материалов. Продукты пиролиза могут служить как газообразным или жидким сырьем для промышленности органического синтеза, так и энергетическим топливом, твердые продукты пиролиза – сырьем для получения углеродных адсорбентов различного назначения. Полученные адсорбенты могут быть использованы для разделения и очистки газов, улавливания летучих органических растворителей, извлечения ценных компонентов из растворов, очистки оборотных вод и питьевой воды. На основе полимерных отходов возможно получать пористые активные угли, пригодные для очистки сточных вод. В лаборатории предложен и опробован в лабораторных условиях применительно к нашим условиям пиролиз смесевых комбинаций отходов низкокалорийных твердых горючих ископаемых с требующими переработки полимерными отходами, в частности, формирование торфополимерных композиций с разным соотношением исходных ингредиентов, определением их оптимальных сочетаний и разработкой наиболее приемлемых условий ведения процесса [3]. Использование указанных композиций торфа и отходов полимера в смесевых составах для пиролиза позволяет решить ряд задач, как технических (устранить явление налипания полимера на внутренних поверхностях реактора и др.), так и на получение твердых продуктов с заданными свойствами при использовании определенных видов катализаторов, которые рассматриваются в качестве сырья для получения селективных сорбентов.

В этих целях были разработаны и изготовлены лабораторные установки по пиролизу в стационарном, подвижном и взвешенном слоях топлива. В зависимости от конкретного целевого продукта каждая из установок имеет свои преимущества и недостатки. Так, для получения в качестве целевого продукта смолы предпочтительным является установка стационарного пиролиза, для получения в качестве целевого пиролизного газа – установка с подвижным слоем топлива.

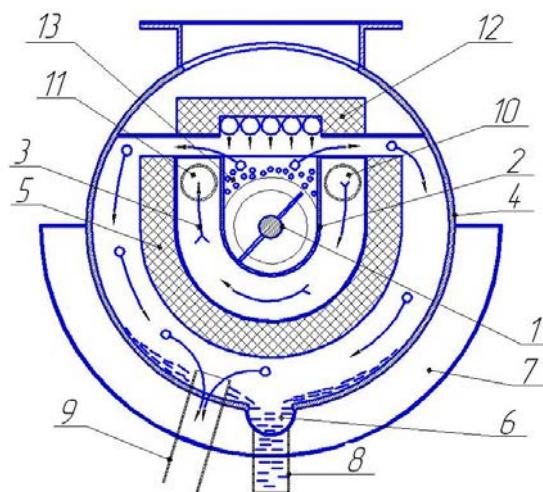
Исследования показали, что, используя способ утилизации полимерных отходов различной природы, наряду с целевым процессом утилизации (ликвидация отходов), можно дополнительно получать в качестве энергоносителей пиролизную смолу со значительно большим выходом, чем из чистого торфа (до 80 %), а также пиролизный газ с существенно большей теплотой сгорания. В будущем при конструировании установок по пиролизной утилизации полимерных отходов указанные факторы могут существенным образом снизить общую себестоимость проекта за счет использования образующихся высококалорийных энергоносителей непосредственно в самом процессе утилизации.

Получение пиролизной смолы в качестве целевого продукта целесообразно для утилизации имеющихся значительных объемов полимерных отходов, так как установки по переработке таких отходов должны быть дополнительно оснащены ректификационными колоннами по фракционированию получаемой смолы на аналоги нефтепродуктов, что существенно повышает общую стоимость объекта по утилизации. Для случаев переработки относительно небольших объемов полимерных отходов предпочтительнее иметь небольшую относительно дешевую установку (лучше мобильную) с получением в качестве целевых продуктов пиролизного газа и твердого остатка. Такой вариант более предпочтителен для Республики Беларусь, где отсутствуют большие объемы локализованных отходов. В таком случае получается газ, который можно использовать как топливо непосредственно в процессе утилизации, а также твердый остаток, который вкупе с введением в смесевую композицию соли металла-катализатора позволит в перспективе получать спектр селективных сорбционных материалов для очистки водных объектов, включая радиоактивные.

Таким образом, предлагаемый способ ликвидации все возрастающих объемов полимерных отходов с использованием пиролиза смесевых композиций (торфа, полимерных отходов, катализаторов)

может быть вполне конкурентоспособным при решении проблем не только утилизации, но и получения ряда конечных товарных продуктов.

В 2020 г. в лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем выполнен отдельный проект «Разработать научно-техническое обоснование эффективной термохимической технологии глубокой комплексной переработки горючих сланцев Беларуси». В результате его выполнения создана опытная установка (рис. 4) и разработан лабораторный технологический регламент по переработке горючих сланцев с получением сланцевой смолы, горючих газов и коксозольного остатка с выделением и конденсацией сланцевой смолы в неоднородном температурном поле. В настоящее время проходит экспертизу заявка на выдачу патента на изобретение «Установка для термохимической переработки горючих материалов методом пиролиза».



**Рис. 4. Поперечный разрез в центральной части опытной установки по термической переработке горючих сланцев:** 1 – шнек-смеситель в виде двухленточной спирали; 2 – желоб открытого типа; 3 – камера высокотемпературного разогрева горячими газами; 4 – камера конденсации; 5 – теплостойкая изоляция; 6 – желоб для сбора конденсатов сланцевой смолы и воды; 7 – водяная рубашка для охлаждения камеры конденсации; 8 – патрубок для слива конденсатов сланцевой смолы и воды; 9 – патрубок для вывода газообразных продуктов; 10 – патрубок для входа разогревающих газов; 11 – патрубок для выхода разогревающих газов; 12 – лучистый нагреватель; 13 – перерабатываемый материал

**Fig. 4. Cross section in the central part of the thermal processing pilot plant of combustible shale:**  
1 – screw-mixer in the form of a two-ribbon spiral; 2 – open type chute; 3 – chamber of high-temperature heating by hot gases; 4 – condensation chamber; 5 – heat-resistant insulation; 6 – chute for collecting of shale tar and water condensates; 7 – water cloth for the condensation chamber cooling; 8 – drain pipe for combustible shale tar and water condensates; 9 – branch pipe for the output of gaseous products; 10 – branch pipe for the inlet of heating gases; 11 – branch pipe for the heating gases outlet; 12 – radiant heater; 13 – processed material

Разработка относится к области термохимической переработки твердых горючих ископаемых и других горючих материалов методом пиролиза с целью получения высококалорийных твердых и жидких продуктов, горючих газов и может быть использована для термохимической переработки бурых углей, горючих сланцев, отходов полимеров и нефтепродуктов.

Установка включает бункер горючих материалов с дозатором, шнековый пиролизер с нагревателем дымовыми газами, соединенный со сборником коксозольного остатка. Для повышения эффективности нагревания перерабатываемого материала и интенсивности удаления продуктов пиролиза с разделением их на конденсирующиеся и газообразные продукты непосредственно в камере термообработки основная часть желоба шнека-смесителя выполнена открытой и окаймлена рубашкой из жаро-прочного стального листа, наружная сторона которого покрыта слоем жаростойкой теплоизоляции, причем основная часть шнека-смесителя помещена в герметичную камеру, стенки которой термостатируются при температуре ниже температуры конденсации смолистых фракций, а в торцевой части термостатируемой камеры со стороны загрузки обрабатываемого материала имеются перекрываемые вентилями выходы газообразных продуктов и продуктов конденсации.

Для дополнительного разогрева перерабатываемого материала над открытой частью желоба может располагаться лучистый нагреватель из никромовой проволоки, уложенной в кварцевые трубы. За

счет дополнительного лучистого обогрева можно до 2 раз повысить производительность установки по термической переработке горючих сланцев.

Данная установка может быть использована для термической переработки методом пиролиза как твердых, так и пастообразных, а также полужидких (например, отработанных смазочных и сма佐очно-охлаждаемых) материалов.

**Изучение реологических свойств композиций на основе каустобиолитов.** Одним из направлений исследований лаборатории является изучение реологических свойств торфа, сапропеля, бурого угля на предмет их применимости в качестве компонентов буровых реагентов, а именно в качестве стабилизаторов глинистых дисперсий, используемых в буровой технике. Исследования направлены на изучение механизма защитного действия реагентов на основе гуминовых веществ торфа и бурых углей, их реологических свойств; выявление факторов, определяющих эффективность углещелочных и торфощелочных реагентов как модификаторов буровых растворов, а также на разработку методов управления физико-химическими свойствами буровых растворов с помощью данных реагентов при бурении в различных геологотехнических условиях. Работы проводятся с целью определения репрезентативных параметров, которые позволят разработать базовые требования к торфяному сырью для получения на его основе эффективных буровых реагентов для регулирования свойств технологических дисперсий. В качестве таких параметров в настоящее время рассматриваются групповой и ботанический состав, зольность, степень разложения. На рис. 5 представлены реологические кривые щелочных дисперсий торфа различного ботанического состава.

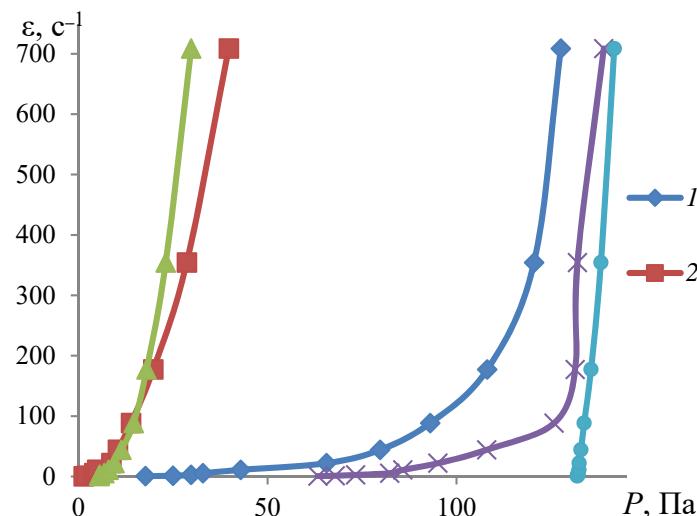


Рис. 5. Реологические кривые течения торфощелочных дисперсий из торфа различных типов:  
1 – верхового сосново-пушицевого; 2 – верхового пушицевого; 3 – низинного деревенско-тростникового;  
4 – низинного осокового; 5 – низинного тростниково-осокового

Fig. 5. Rheological curves of the flow of peat and leaching disperses from the peat of different types:  
1 – upland pine-cotton grass; 2 – upland cotton grass; 3 – lowland tree-reed;  
4 – lowland sedge; 5 – lowland reed-sedge

Установлено, что на все реологические параметры торфощелочных суспензий наибольшее влияние оказывает степень разложения, причем для всех параметров, кроме пластической вязкости, наблюдается обратная зависимость. Величина эффективной вязкости наиболее тесно связана с содержанием битумов и фульвокислот, трудногидролизуемых и негидролизуемых веществ, т. е. чем больше их содержание в торфе, тем выше величина эффективной вязкости торфощелочных реагентов, приготовленных из него. Существенная прямая связь величины пластической вязкости наблюдается со степенью разложения и обратная – с зольностью торфа. На прочность структуры дисперсий торфа более сильное влияние оказывает содержание в нем гуминовых веществ, зольных элементов, а также негидролизуемых веществ [4, 5].

Проведение данных исследований позволит выработать требования к торфу и сапропелю как сырью для получения эффективных гуматных реагентов, регулирующих свойства технологических дисперсий, что, в свою очередь, позволит расширить ассортимент производимой продукции на основе данных каустобиолитов.

**Исследование коллоидно-химических и сорбционных свойств гуминовых веществ.** Установлено, что в зависимости от исходного сырья удельное содержание гуминовых соединений, выделенных

при щелочной экстракции из каустобиолитов, переходящих из растворенного состояния в коллоидное и далее в осадок, существенно различается. Минимальное количество гуминовых соединений переходит в осадок в диапазоне pH 8,0–12,0 и не превышает 8 %. В ряду торф – сапропель – бурый уголь – леонардит увеличивается содержание фракций, осаждаемой в диапазоне pH 5,0–8,0, и оно может достигать более 80 %. Выявлено, что содержание кислых функциональных групп, в первую очередь карбоксильных, закономерно увеличивается при переходе от фракций, выделенных в щелочной среде, к фракциям, выделенным в кислой области. Показано, что условия высушивания образцов гуминовых соединений при температуре до 80 °C не влияют на содержание в них карбоксильных функциональных групп. Установлено, что из всех рассмотренных условий сушки наиболее мягкой является сушка при 50 °C в вакууме, о чем свидетельствует более высокая оптическая плотность растворов. На динамику растворения гуминовых соединений вне зависимости от реакции среды и присутствующего катиона определяющее значение оказывает сырье, из которого они были выделены.

Изучена обратимость восстановления свойств H- и Na-форм фракций гуминовых соединений различных каустобиолитов в зависимости от способа их обезвоживания. Установлено, что H-форма гуминовых соединений хуже подвергается восстановлению по сравнению с Na-формой, а степень дисперсности не оказывает существенного значения на процесс растворения.

**Комплексная переработка торфяного сырья.** Одним из направлений научных исследований лаборатории явились работы по глубокой комплексной переработке торфа. Цель данной работы – провести оценку возможности расширения сырьевой базы, пригодной для получения ряда новых продуктов глубокой комплексной переработки торфа, добываемого из месторождений, разрешенных к добыче для биотермохимической переработки. Произведена оценка ресурсов, особенностей размещения и качественного состава торфяного сырья для целей комплексной биотермохимической переработки перспективных и крупных по площади и запасам месторождений Славное и Есмоновский Мох.

По фондовым материалам разведки прежних лет оценена геологическая изученность и дана характеристика стратиграфии и запасов торфа месторождений Славное и Есмоновский Мох, выполнен отбор представительных технологических образцов торфяного сырья обоих месторождений. Определены общетехнические характеристики (ботанический состав, степень разложения, зольность, влажность), выполнен элементный анализ органической массы отобранных образцов, проведен групповой анализ вещественного состава органического вещества отобранных образцов торфа [6–8].

На основе анализа всех имеющихся архивных материалов по ресурсам торфа и результатам тщательного изучения химико-технологических и других характеристик сырья составлен номенклатурный перечень продукции глубокой комплексной переработки торфа из сырья месторождений Славное и Есмоновский Мох, рекомендуемой к производству. Обоснована перспективность производства трех инновационных продуктов – торфяного активированного угля, нефтепоглощающего сорбента и концентрированного комплексного гуминового микроудобрения «Элегум». Наработаны лабораторные партии данной продукции, проведены анализ и оценка их потребительских качеств.

С учетом корректировки основных направлений использования и в какой-то мере востребованности сегодня такой продукции, а также высокой добавочной стоимости и научной ценности совершенствующихся технологий, в настоящее время приоритетно выделены виды продукции, объединяющие следующие основные блоки:

- сорбенты (торфяные активированные угли, сорбенты торфяные (включая нефтесорбенты), газосорбенты, сорбенты тяжелых металлов из водных сред);
- биогуматные препараты (стимуляторы роста, кормовые добавки, консерванты кормов);
- удобрения почвенных систем органоминеральные, комплексные гранулированные, мелиоративно-удобрительные материалы, а также жидкие гуминовые комплексные микроудобрения);
- кипованный торф (сырец для продукции со степенью разложения до 20 %);
- энергетическое и бытовое топливо (фрезерный торф, торфобрикеты).

На основании учета таких показателей, как научная ценность и высокая добавочная стоимость, потребительский спрос и качество имеющегося на месторождении сырья, определены виды товарной продукции, которая может быть получена из указанного сырья, оценены его ориентировочные объемы и объемы получаемой продукции, а также примерные ценовые показатели указанной продукции. Так как все видовое разнообразие продукции очень сложно, в частности, расход сырья и стоимостные показатели под конкретные виды продукции, они сгруппированы по близким направлениям использования и проведена усредненная оценка как по расходу сырья на единицу продукции, так и по стоимостным показателям, которые в рыночных условиях варьируют в очень широких границах.

Исходя из полученных данных, наиболее предпочтительным является получение различного направления использования сорбентов, затем – биогуматных препаратов по обоим изученным месторождениям относительно топливного направления (торфобрикет, фрезерный торф).

**Переработка отходов производства.** Определены способы повышения эффективности выщелачивания сорбируемых соединений из отходов горно-технологических производств. Расчетными методами проанализирована возможность повышения эффективности процессов выщелачивания из почвогрунтов и отходов горно-технологических производств радионуклидов, тяжелых и редких металлов с помощью растворов [9]. Рассмотрены различные способы выщелачивания водорастворимых сорбируемых

соединений из дисперсных сред, включающие многократное и многоступенчатое выщелачивание, а также выщелачивание на встречных потоках. Для всех рассмотренных способов приведены аналитические решения, позволяющие рассчитать степень извлечения (очистки) извлекаемых соединений, расход выщелата и его концентрацию. В частности, решена система уравнений для многоступенчатого выщелачивания. Показано, что за счет выбора оптимальных приемов и параметров можно существенно сократить расход выщелачивающих растворов и увеличить в них концентрацию извлекаемых элементов.

Установлено, что наиболее перспективным способом извлечения водорастворимых сорбируемых соединений являются многоступенчатое выщелачивание и обмен в противотоках выщелачивающего раствора и обрабатываемого материала.

Исследования состава и свойств зольных отходов, образующихся на торфоперерабатывающих предприятиях Беларуси, показали, что данный материал можно использовать в качестве сырья для производства различных продуктов нетопливного назначения. Выявлено, что pH водной суспензии золы варьируется в значительных диапазонах: от слабощелочной (pH 8,05) до сильнощелочной (pH 13,5–14,0). Это в первую очередь зависит от типа торфа. Показано, что для верховых типов торфа pH водной суспензии золы, как правило, слабощелочная, для переходных и низинных торфов реакция среды может достигать 14,0. Содержание тяжелых металлов для большинства образцов не превышает предельно допустимую концентрацию для почв сельскохозяйственного назначения по валовому содержанию элементов. Полученные результаты положены в основу разработки нормативно-технической документации и организации производства на базе торфопредприятий двух новых продуктов с использованием торфяной золы.

В процессе производства торфяных брикетов и торфяной сушенки торф подвергается сушке в псевдоожженном слое, в результате чего происходит истирание торфяной частицы. Очистку отходящих газов осуществляют двухстадийным способом путем сухого и мокрого обеспыливания. Второй стадией является мокрое пылеудаление с использованием скрубберных систем. В результате такой очистки образуется шлам, который в настоящее время не используется. Изучение динамики изменения группового состава органической части торфа, торфяной сушенки и шлама свидетельствует о том, что содержание битумов в образцах практически не меняется. Абсолютное содержание битумов соответствует статистическим значениям для торфа данного типа. Содержание легкогидролизуемых и водорастворимых веществ увеличивается при переходе от исходного торфа к шламу. Динамика изменения содержания гуминовых веществ носит нелинейный характер. В исходном образце их содержание составляет 56,5 %. Сушка вызывает достоверное снижение содержания гуминовых веществ. Повторная гидратация торфяного материала после сушки приводит к восстановлению содержания гуминовых веществ, а выдерживание в штабеле – даже к превышению их содержания по сравнению с исходным сырьем. Проведено определение фитотоксических свойств водных вытяжек торфяного сырья и шлама, показавшее их незначительную фитотоксичность. Результаты проведенных исследований использованы при разработке нормативно-технической документации и организации производства материала на основе шлама.

#### Список использованных источников

1. Бровка, А. Г. Приборы и методы исследования теплофизических характеристик и фазового состава воды горных пород при отрицательных температурах / А. Г. Бровка, И. И. Романенко // Горная механика. – 2009. – № 1. – С. 71–79.
2. Расчеты температурного режима и энергетических затрат при формировании ледопородных ограждений для проходки шахтных стволов / Г. П. Бровка [и др.] // Инженерная геология. – 2021. – Т. 16, № 1. – С. 74–85.
3. Утилизация полимерных отходов пиролизом торфополимерных композиций / И. И. Лиштван [и др.] // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 10–14.
4. Лиштван, И. И. Физико-химические свойства модифицированного углешелочного реагента / И. И. Лиштван, В. Н. Алейникова, А. М. Абрамец // Природопользование. – Минск, 2013. – Вып. 24. – С. 168–172.
5. Лиштван, И. И. Реологические свойства гуминовых веществ торфа и бурого угля / И. И. Лиштван, В. Н. Алейникова // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 169–174.
6. Комплексная переработка торфа месторождения Есмоновский Мох с получением научкоемкой продукции / И. И. Лиштван [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хім. науку. – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 96–104.
7. Переработка сырья торфяного месторождения Славное / И. И. Лиштван [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хім. науку. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 212–215.
8. Перспективы получения основных видов торфяной продукции из сырья месторождений Славное и Есмоновский Мох / И. И. Лиштван [и др.] // Природопользование. – 2021. – № 2. – С. 85–95.
9. Бровка, Г. П. Повышение эффективности выщелачивания радионуклидов, тяжелых и редких металлов из почвогрунтов и отходов горно-технологических производств / Г. П. Бровка, И. Н. Дорожок // Природопользование. – 2021. – № 2. – С. 106–113.

### References

1. Brovka A. G., Romanenko I. I. *Pribory i metody issledovaniya teplofizicheskikh harakteristik i fazovogo sostava vody gornyh porod pri otricatelynyh temperaturah* [Instruments and methods for studying the thermophysical characteristics and phase composition of rock water at subzero temperatures]. *Gornaya mekhanika*, 2009, no. 1, pp. 71–79. (in Russian)
2. Brovka G. P., Agutin K. A., Muchko M. V., Lipnickij N. A. *Raschety temperaturnogo rezhima i ehnergeticheskikh zatrat pri formirovaniyu ledoporodnyh ograzhdenij dlya prohodki shahnyh stvolov* [Calculations of the temperature regime and energy costs in the formation of ice fences for the penetration of mine shafts]. *Inzhenernaya geologiya*, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 74–85. (in Russian)
3. Lishtvan I. I., Dudarchik V. M., Krajko V. M., Anufrieva E. V. *Utilizaciya paolimernyh othodov pirolizom torpolimernyh kompozicij* [Polymeric waste disposal by pyrolysis of peat polymer compositions]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2022, no. 2, pp. (in Russian)
4. Lishtvan I. I., Aleynikova V. N., Abramets A. M. *Fiziko-khimicheskiye svoystva modifitsirovannogo ugleshchelochchnogo reagenta* [Physical and chemical properties of the modified carbon-alkali reagent]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*. Minsk, 2013, iss. 24, pp. 168–172. (in Russian)
5. Lishtvan I. I., Aleynikova V. N. *Reologicheskiye svoystva guminovykh veshchestv torfa i burogo uglya* [Rheological properties of peat and brown coal humic substances]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 169–174. (in Russian)
6. Lishtvan I. I., Dudarchik V. M., Krajko V. M., Anufrieva E. V. *Kompleksnaya pererabotka torfa mestorozhdeniya Esmonovskij Moh s polucheniem naukoemkoj produkci* [Complex processing of peat of the Esmonovsky moh deposit with the receipt of hightech products]. *Vesti Nats. Akad. navuk Belarusi. Ser. him. navuk*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 96–104. (in Russian)
7. Lishtvan I. I., Dudarchik V. M., Krajko V. M., Anufrieva E. V. *Pererabotka syr'ya torfyanogo mestorozhdeniya Slavnoe* [Processing of the raw materials of the peat deposit glorious]. *Vesti Nats. Akad. navuk Belarusi. Ser. him. navuk*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 212–215. (in Russian)
8. Lishtvan I. I., Dudarchik V. M., Krajko V. M., Anufrieva E. V. *Perspektivy polucheniya osnovnyh vidov torfyanoy produkci* iz syr'ya mestorozhdenij Slavnoe i Esmonovskij Moh [Perspectives of obtaining the main types of peat products from raw materials of the global and Esmonovsky moh deposits]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021, no. 2, pp. 85–95. (in Russian)
9. Brovka G. P., Dorozhok I. N. *Povyshenie effektivnosti vyshchelachivaniya radionuklidov tyazhelyh i redkih metallov iz pochvogruntov i othodov gorno tekhnologicheskikh proizvodstv* [Improving the efficiency of leaching of radionuclides, heavy and rare metals from soils and waste from mining and technological industries]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021, no. 2, pp. 106–113. (in Russian)

### Информация об авторах

**Лиштван Иван Иванович** – академик, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

**Бровка Геннадий Петрович** – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: brovka\_gp@tut.by

**Янута Юрий Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией физико-химической механики природных дисперсных систем, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanuta@tut.by

**Мурашко Андрей Анатольевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: amurbmw@tut.by

### Information about the authors

**Ivan I. Lishtvan** – Academician, D. Sc. (Technical), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

**Gennady P. Brovka** – D. Sc. (Technical), Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: brovka\_gp@tut.by

**Yurij G. Yanuta** – Ph. D. (Technical), Head of Laboratory of Physical-Chemical Mechanics of Natural Dispersed Systems, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanuta@tut.by

**Andrey A. Murashko** – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: amurbmw@tut.by

*Дедюля Иван Владимирович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: dedyulyaivan@yandex.by

*Дударчик Владимир Михайлович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: dudwm@tut.by

*Крайко Валентина Михайловна* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: vvakraiko@gmail.com

*Бровка Андрей Геннадьевич* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

*Алейникова Вера Николаевна* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: everan@tut.by

*Агутин Кирилл Алексеевич* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: amurbmw@tut.by

*Дорожок Инга Николаевна* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: ingadorozhok@list.ru

*Ануфриева Елена Владимировна* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru

*Ivan V. Dedyulya* – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: dedyulaivan@yandex.by

*Uladimir M. Dudarchik* – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: dudwm@tut.by

*Valiantsina M. Kraiko* – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: vvakraiko@gmail.com

*Andrey G. Brovka* – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

*Vera N. Aleinikova* – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: everan@tut.by

*Kirill A. Agutin* – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

*Inga N. Dorozhok* – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: ingadorozhok@list.ru

*Alena U. Anufrieva* – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНСТИТУТА ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НАН БЕЛАРУСИ В ОБЛАСТИ ГЕНЕЗИСА, ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ, ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ ТОРФА И САПРОПЕЛЯ

О. М. Гайдукевич, Б. В. Курзо, В. Б. Кунцевич, И. В. Кляуззе, Т. И. Макаренко,  
М. В. Ворона, А. Ю. Татков, А. И. Сорокин, И. В. Агейчик

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Представлены результаты НИР в области использования и охраны торфяных и сапропелевых месторождений, выполненных в рамках Государственной научно-технической программы и Государственной программы научных исследований в 2018–2022 гг. Выявлены перспективы и проблемы использования месторождений с особо цennыми видами сырья для получения продукции комплексной переработки. Особое внимание уделено перспективным для освоения крупным торфяным месторождениям Славное и Эсмоновский Мох. Выявлены ресурсы и закономерности размещения органического сапропеля под торфяными залежами. Даны характеристика технических и технологических решений при освоении сапропелевых и торфяных месторождений. Приведен перечень объектов, на которых использованы результаты научных исследований.

**Ключевые слова:** торф; сапропель; месторождения; запасы; сырьевые базы; освоение месторождений; комплексное использование; модификация; физико-механическое воздействие.

**Для цитирования.** Гайдукевич О. М., Курзо Б. В., Кунцевич В. Б., Кляуззе И. В., Макаренко Т. И., Ворона М. В., Татков А. Ю., Сорокин А. И., Агейчик И. В. Результаты научных и прикладных исследований Института природопользования НАН Беларуси в области генезиса, оценки ресурсов, добычи и переработки торфа и сапропеля // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 33–52.

## THE RESULTS OF SCIENTIFIC AND APPLIED RESEARCH OF THE INSTITUTE OF NATURE MANAGEMENT OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS IN THE FIELD OF GENESIS, RESOURCE ASSESSMENT, THE EXTRACTION AND PROCESSING OF PEAT AND SAPROPEL

О. М. Гайдукевич, Б. В. Курзо, В. Б. Кунцевич, И. В. Кляуззе, Т. И. Макаренко,  
М. В. Ворона, А. Ю. Татков, А. И. Сорокин, И. В. Агейчик

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** The results of research in the field of the use and protection of peat and sapropel deposits, carried out within the framework of the State Scientific and Technical Program and the State Program of Scientific Research in 2018–2022, are presented. The prospects and problems of the use of deposits with especially valuable types of raw materials for products obtaining of complex processing are revealed. Particular attention is paid to the large peat deposits - Slavnoe and Esmonovsky Mokh, which are promising for development. The resources and regularities of organic sapropel placement under peat deposits are revealed. The characteristics of technical and technological solutions in the development of sapropel and peat deposits are given. The list of objects on the used results of scientific studies is given.

**Keywords:** peat; sapropel; deposits; reserves; resource bases; deposits development; integrated use; modification; physical and mechanical impact.

**For citation.** Gaidukevich O. M., Kurzo B. V., Kuntsevich V. B., Klyauzze I. V., Makarenko T. I., Vorona M. V., Tatkov A. Yu., Sorokin A. I., Ageichik I. V. The results of scientific and applied research of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus in the field of genesis, resource assessment, the extraction and processing of peat and sapropel. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 33–52.

**Введение.** Институт природопользования НАН Беларуси занимает ведущие позиции в области изучения торфяных и сапропелевых ресурсов [1, 2]. Сапропель как предмет изучения включает в себя исследования в области его состава и свойств, генезиса, ресурсов, проблем использования и освое-

ния сапропелевых месторождений. Ранее вопросы образования сапропелевых месторождений описаны А. П. Пидопличко, вопросы их состава и свойств, добычи и полезного использования исследованы М. З. Лопотко. В настоящее время созданы предпосылки для широкого вовлечения ресурсов сапропеля в хозяйственный комплекс Беларуси: хорошо изучены состав и свойства сапропеля, его генезис и ресурсы, закономерности формирования и размещения, структура запасов сапропеля и его роль в рациональном природопользовании и охране окружающей среды. Даны характеристика хозяйственного значения запасов сапропеля. На статистически обоснованном материале показаны взаимосвязи между составом и свойствами сапропеля и на этой основе разработана оригинальная методика прогнозной оценки ресурсов и их состава в неисследованных озерах. Выполнен анализ и обобщен фактический материал по стратиграфии и геохимии озерных отложений в различных природных условиях Беларуси, что позволило всесторонне охарактеризовать эволюцию разнотипных месторождений сапропеля, разработать научно обоснованную генетическую классификацию залежей и выполнить районирование территории Беларуси по вещественно-генетическим типам озерного осадконакопления.

Учеными Института природопользования НАН Беларуси на основании изучения свойств сапропеля разработана промышленно-генетическая классификация (СТБ 17.04.02-01-2010), в которой полезное ископаемое разделено на четыре типа: органический с зольностью до 30 %; кремнеземистый с зольностью 30–85 % с преобладанием в составе алюмосиликатов; карбонатный с зольностью 30–85 % с преобладанием карбонатов кальция; смешанный с зольностью 30–60 %, в котором соотношение органического вещества, соединений кремнезема и кальция приблизительно одинаково.

В результате поисково-оценочных работ на сапропель с 1976 г. специалистами Института разведано 661 из 1918 озер ледникового происхождения площадью более 1 га. В основном это достаточно крупные месторождения сапропеля. Институтом природопользования НАН Беларуси успешно продолжаются работы по вовлечению в хозяйственный оборот новых месторождений. Полученные данные систематизированы в Кадастре сапропелевых отложений озер по административным областям Беларуси, разработан его электронный вариант. Исследования показывают, что в малых озерах также аккумулированы большие запасы сапропеля, однако они изучены недостаточно.

В соответствии с кадастровыми данными сегодня запасы сапропеля в Республике Беларусь прогнозно оцениваются в 4 млрд м<sup>3</sup>, из которых 2,9 млрд м<sup>3</sup> залегают в озерах (в том числе 2,1 млрд м<sup>3</sup> разведано) и 1,1 млрд м<sup>3</sup> – под торфяной залежью. Запасы сапропеля, залегающие под слоем торфа, систематизированы в специальном справочнике, из которого следует, что в 1256 торфяных месторождениях попутно с торфом разведано более 1127 млн м<sup>3</sup> сапропеля, а 130 млн м<sup>3</sup> подсчитаны прогнозно.

По результатам научно-прикладных работ по поиску и детальной разведке месторождений сапропеля организована добыча лечебных грязей, кормовых добавок, удобрений и буровых растворов на озерах Червоное, Святое, Великое Гомельской области, Судобль Минской области, Вальверово, Малая Корчинка Витебской области, Лочинское Могилевской области и других объектах. В Гомельской области проведены изыскания сапропеля под торфом на месторождении «Прибыловичи» и на основе его сырьевой базы в ОАО «Лельчицкий агросервис» внедрена технология производства сапропелевой кормовой добавки, а также введен в эксплуатацию цех производительностью 10 тыс. т добавки в год.

В последнее время дальнейшее использование сапропеля и торфа в народном хозяйстве связано с разведкой новых сырьевых баз, расширением номенклатуры и качества выпускаемой продукции. При решении этих задач особое внимание уделяется новой продукции, производство которой связано с технологическими процессами глубокой переработки торфа и сапропеля. Большой объем научных и прикладных исследований, выполненных в прошлом и продолжающихся в настоящее время, способствует получению обширного ассортимента продукции и товаров из торфа и сапропеля, которые могут найти широкое применение в хозяйственном комплексе республики. Для получения разнообразной продукции высокого качества требуется тщательный выбор исходного торфяного и сапропелевого сырья. Успешное выполнение данного условия гарантировано многообразием качественных характеристик торфяных и сапропелевых залежей, обусловленных различиями их генезиса.

Цель исследований в 2018–2022 гг. в рамках подпрограммы «Природные ресурсы и экологическая безопасность» ГПНИ «Природопользование и экология 2016–2020» состоит в обосновании перспективных для разработки месторождений, научном обосновании методов подготовки и модификации торфа и сапропеля для повышения качества продукции комплексной глубокой переработки и расширения объемов их использования.

**Методы и объекты исследований.** Закономерности формирования и пространственного размещения крупных месторождений торфа с целью выбора перспективных объектов для комплексной биотермохимической переработки исследованы на примере объектов: типичных верховых и низинных месторождений «Туршевка–Чертово» Крупского района Брестской области, «Славное» Толочинского района Витебской области, «Есмоновский Моз» Белыничского района, «Нивское» Кличевского района,

«Трилесино» Быховского района Могилёвской области. Объекты исследования сапропеля включали детально изученные месторождения Червоное Житковичского района и Святое Рогачёвского района Гомельской области, а также выбывшие из эксплуатации торфяные участки месторождений «Нивское» Кличевского района Могилёвской области, «Удховда» Пружанского района Брестской области и др. Большинство из указанных месторождений в настоящее время разрабатываются.

Оценка влияния механодеструкции ультразвукового воздействия на изменения структуры и физико-химических свойств торфа, сапропеля и их смесей с целью повышения биологической активности продукции проведена на опытных установках (аппарат вихревого слоя (ABC), роторно-импульсный аппарат и др.) по специально разработанным методикам. Из обработанных образцов выделены гуматы калия и натрия в условиях, соответствующих получению препарата «Тосагум» и проверена их биологическая активность методом вегетационных опытов (метод водных культур на кукурузе, проростки ячменя на песчаной почве и др.).

При обосновании влияющих факторов для организации выпуска торфяной продукции комплексного назначения, в том числе и активированных углей, в качестве алгоритма расчетов выбрана обобщенная функция желательности Харрингтона. В основе ее построения лежит идея преобразования натуральных значений влияющих факторов в безразмерную шкалу желательности, в которую могут входить самые разнообразные частные отклики: технологические, технико-экономические, экономические, качественные характеристики исследуемого объекта и др.

Для оценки количественных и качественных характеристик торфяного и сапропелевого сырья месторождений, их генезиса и геоморфологии использованы результаты полевых изысканий авторов статьи и фондовые материалы детальной разведки Госгеолфонда Минприроды.

**Результаты и их обсуждение. Сырьевые базы торфа и сапропеля для комплексной переработки.** Перспективным направлением использования ресурсов торфа и сапропеля является их глубокая термобиохимическая переработка с организацией выпуска продукции многоцелевого назначения с высокой добавленной стоимостью [3, 4]. Указом Президента Республики Беларусь от 12.11.2007 № 563 в качестве основных сырьевых баз для этих целей зарезервировано 14 крупных торфяных месторождений, которые имеют различную площадь, запасы и качественные характеристики торфа. Многие из зарезервированных торфяных месторождений начали развитие с озерной стадии, поэтому включают запасы сапропеля.

С целью выбора перспективных для комплексной глубокой переработки торфа месторождений, в том числе из перечня зарезервированных, выявлены природные особенности развития таких месторождений, объяснен генезис сформированных залежей, обоснованы методы и критерии выделения наиболее перспективных участков для первоочередного освоения с целью выпуска продукции комплексного использования [5].

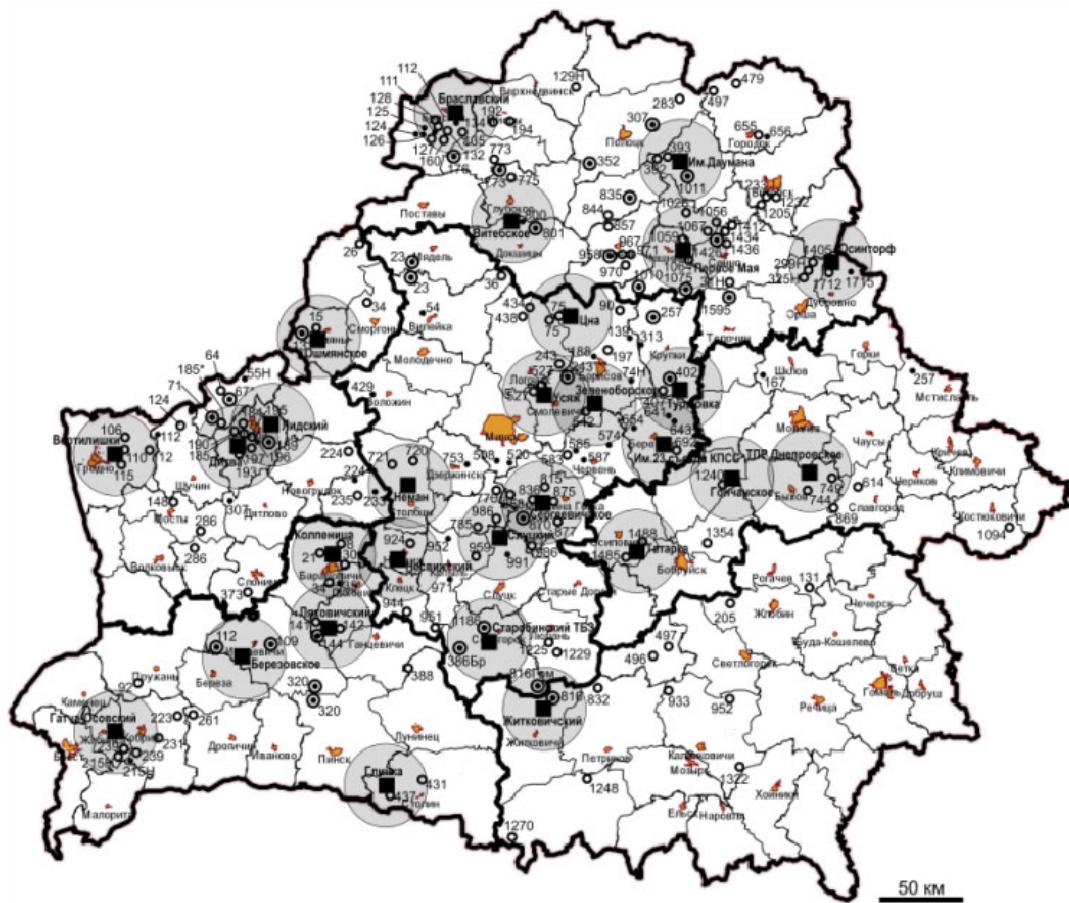
Проанализировано распределение запасов и качественных характеристик торфяного сырья в торфяных месторождениях, отнесенных согласно постановлению Совета Министров Республики Беларусь 30.12.2015 № 1111 к разрабатываемому фонду [6, 7]. Составлены схема размещения месторождений разрабатываемого торфяного фонда республики (рис. 1) и база данных, включающая запасы и качественные характеристики торфа на перспективных к разработке месторождениях, тяготеющих к ключевым торфопредприятиям, для каждого из которых определено не менее пяти торфяных участков для возможной разработки торфа. В базу данных включены данные по запасам торфа на каждом торфяном месторождении разрабатываемого фонда, вещественному составу, типам торфяной залежи и глубинам полезного ископаемого, категории геологоразведочных работ, а также картографические материалы – фрагменты топографических карт с ландшафтной ситуацией, космические снимки для оценки современного состояния (включая растительный покров) и нарушенности месторождений хозяйственной деятельностью.

Изучение запасов торфа и сапропеля, их качественных характеристик, позволяют предложить показатели перспективности торфяных и сапропелевых ресурсов административного района для комплексной глубокой переработки. Для торфяных ресурсов основным критерием перспективности комплексного использования является увеличенная до 40 % и более концентрация верхового и переходного торфа в общем объеме торфяных запасов административного района, а также наличие не менее четырех категорий торфяного сырья каждого типа. В пределах административных районов Беларуси выделено четыре степени обеспеченности сырьем – от очень высокой до низкой. Около половины районов Беларуси (58 из 118) имеют высокую обеспеченность торфом разного типа и подходят для создания предприятий по комплексной переработке торфяного сырья. Для ресурсов сапропеля критерием перспективности для комплексного освоения является наличие промышленных запасов полезного ископаемого разного типа на выбывших из эксплуатации торфяных месторождениях.

На основе предложенных показателей разработана схема районирования территории Беларуси по обеспеченности торфосапропелевым сырьем, в пределах которой выделены пять областей и три

подобласти. Схема позволяет планировать размещение предприятий по комплексному использованию торфа и сапропеля.

Разработаны критерии разделения месторождений и их участков по степени перспективности для комплексной многоцелевой переработки торфяного сырья. На перспективных месторождениях общий объем запасов торфа должен составлять не менее 3 млн м<sup>3</sup>, продолжительность освоения – не менее 25 лет. На месторождениях этой группы должно насчитываться не менее 15 видов торфяного сырья низинного, верхового и переходного типов, а также от двух до четырех типов сапропеля. На условно перспективных для целей глубокой комплексной переработки торфа месторождениях должно быть сосредоточено не менее 2 млн м<sup>3</sup> кондиционного торфяного сырья двух или трех типов, не менее 10 видов торфяного сырья, состоящих из 20–25 видов торфа. На неперспективных месторождениях запасы торфа, пригодного для комплексной переработки, составляют менее 1 млн м<sup>3</sup>, а общее количество видов торфяного сырья – менее 10.



**Рис. 1. Месторождения разрабатываемого торфяного фонда республики в зоне 25 км действующих торфопредприятий**

**Fig. 1. Deposits of the developed peat fund of the republic in the zone of 25 km of operating peat enterprises**

Весьма перспективны для освоения и комплексного использования сырьевые базы крупных торфяных месторождений Славное и Эсмоновский Моз Крупского и Березинского районов Минской области и Белыничского района Могилёвской области. Для оценки количественных и качественных характеристик торфяного сырья месторождений, их генезиса и геоморфологии использованы результаты полевых изысканий и фондовые материалы детальной разведки. Построены стратиграфические профили рельефа дна и поверхности торфяных залежей, выделены границы торфа разного типа и сапропеля. Выявлены сильные прямые корреляционные связи между расчлененностью рельефа поверхности торфяной залежи и количеством видов строения залежей (коэффициент корреляции  $r = 0,61$ ), максимальной мощностью торфа и его средней глубиной на профиле ( $r = 0,64$ ), количеством категорий торфяного сырья и количеством генетических центров на профиле ( $r = 0,86$ ). Прогноз видового разнообразия торфяной залежи возможен по уравнению регрессии  $Y_1 = 21,6X_1 - 19,8$ , где  $X_1$  –

глубина расчленения рельефа поверхности залежи. Количество категорий торфяного сырья  $Y_2$  по сумме генетических центров в залежи  $X_2$  описывает уравнение  $Y_2 = 1,02X_2 + 3,28$ .

Для анализа условий формирования залежей детально изученных месторождений Славное и Есмоновский Мох составлена база данных общетехнического состава торфа и сапропеля, включающая данные общетехнических анализов по 91 пункту отбора (697 образцов) на месторождении Славное и 174 пунктам отбора (2700 образцов торфа и 96 образцов сапропеля) на месторождении Есмоновский Мох. Отдельно в базу включены данные по составу придонных образцов и расчлененности поверхности торфяной залежи, минерального ложа, количеству генетических центров, видов залежи и категорий торфяного сырья, данные по средним и максимальным глубинам торфа на каждом исследованном профиле.

Исследованиями стратиграфии торфа в залежах установлено, что в более обводненном месторождении Есмоновский Мох со значительными участками залежи сапропеля под торфом и продолжительным этапом накопления сначала низинного, а потом переходного торфа, складывались благоприятные условия для одновременной смены типов залежей по всей площади месторождения. В менее обводненных условиях на месторождении Славное абсолютные отметки перехода генетических слоев торфа имеют большую вариабильность по площади, что свидетельствует о заметных различиях в скорости накопления торфа в месторождениях, расположенных на возвышенных уровнях ландшафта. Изменчивость средних уровней смены генетических слоев, выраженная коэффициентом вариации для всех точек наблюдения в залежи месторождения Есмоновский Мох в 2 раза ниже, чем в залежи месторождения Славное. Наименьшей изменчивостью в залежи месторождения Есмоновский Мох отличается абсолютная высота границы перехода сапропеля в торф, имеющая коэффициент вариации 0,55 %, в то время как высоты средних границ перехода генетических слоев торфа имеют больший разброс, так как коэффициенты вариации изменяются от 0,58 до 1,10 %.

Информативными критериями, характеризующими повышенную обводненность торфяного месторождения являются наличие, средняя мощность и площадь распространения сапропеля. На месторождении Славное, образовавшемся на возвышенных формах рельефа, сапропель встречается в единичных точках и имеет малую среднюю мощность (0,25 м), в то время как в более обводненном месторождении Есмоновский Мох, в котором отметки дна на 11 м ниже, средняя мощность сапропеля составляет 1,4 м при максимальной 4,0 м. На торфяных месторождениях Витебской области, подстилаемых сапропелем, выявлена закономерность увеличения относительной доли объектов, прошедших озерную стадию при увеличении площади залежи низинного типа с 32 % для чисто верховых месторождений до 53 % для смешанных низинных с верховыми и переходными участками и 64 % для низинных месторождений.

Анализ полученных баз данных показывает, что в обоих месторождениях превалируют магелланитум залежи: на месторождении Славное они составляют 92 % общего количества разрезов, около 7 % разрезов представлено верховыми залежами иного типа и только 1 % – разрезами смешанного, переходного и низинного типов. На месторождении Есмоновский Мох распространенность малелланитум залежей составляет 64 %, встречаемость иных разрезов верхового типа – 29, разрезов смешанного и низинного типов – 7 % от общего количества.

Положение в рельефе и степень влияния грунтовых вод на начальном этапе развития залежей оказывают заметное влияние на вещественный состав торфа. Придонные слои торфа более обводненного месторождения Есмоновский Мох на 42 % сложены переходными видами, на 35 % – низинными и только на 23 % – верховыми. Придонный слой торфа на месторождении Славное в 86 % случаев сложен верховыми видами, на переходные торфа приходится 12 % исследованных образцов, на низинные – только 2 %.

Для обеих залежей характерна закономерность: чем больше мощность накопившегося торфа и на более глубокой отметке располагается придонный горизонт торфа, тем относительно реже в нем происходит смена видов торфа в двух нижних генетических слоях залежи. Это свидетельствует о более стабильных условиях торфонакопления в генетических центрах месторождений в поздне- и последниковое время, по сравнению с голоценовым временем, когда торф формировался на более возвышенных участках рельефа дна и происходило смещение точек роста залежи от центра к периферии, при этом резко изменились условия обводненности.

В Витебской области в пределах Поозерского оледенения выявлена закономерность приуроченности самых малых торфяных месторождений площадью до 10 га к моренным отложениям (рис. 2). Из 345 малых торфяных месторождений 260, или 75 %, сосредоточено на повышенных отметках рельефа в пределах моренных ландшафтов, которые способствуют изолированности котловин и хорошей их сохранности. В подтверждение данной зависимости установлено, что в границах административных районов Витебской области относительное количество малых торфяных месторождений площадью до 10 га тесно коррелирует ( $r = 0,64$ ) с относительной площадью распространения моренных покров-

ных отложений. В Шарковщинском, Миорском, Докшицком, Ушачском, Чашникском, Бешенковичском и Оршанском районах все очень малые по площади торфяные месторождения сосредоточены только в пределах распространения моренных покровных пород.

На основании результатов работ по составлению схемы распределения торфяников по направлениям использования на период до 2030 г. рассчитаны зависимости изменения средних значений основных общетехнических характеристик (зольность и степень разложения) торфа и его глубины в торфяных месторождениях по административным областям республики в зависимости от географической широты [8]:

– усредненная степень разложения торфа  $R$  с юга на север изменяется по зависимости  $R = -2,2X_3^2 + 234,6X_3 - 6216$  ( $r = 0,86$ ), где  $X_3$  – географическая широта центра области. Максимумы показателя приходятся на месторождения Минской и Гродненской областей;

– зольность торфа  $A^c$  по этому же направлению изменяется по зависимости  $A^c = -1,3X_4^2 + 138,4X_4 - 3662$ . Минимумы показателя приходятся преимущественно на объекты Витебской области;

– средняя глубина торфа  $H_t$  в этом же направлении возрастает линейно с интервалом в 0,3 м на 1° с. ш. и описывается зависимостью  $H_t = 0,31X_5 - 14,5$  ( $r = 0,91$ ).

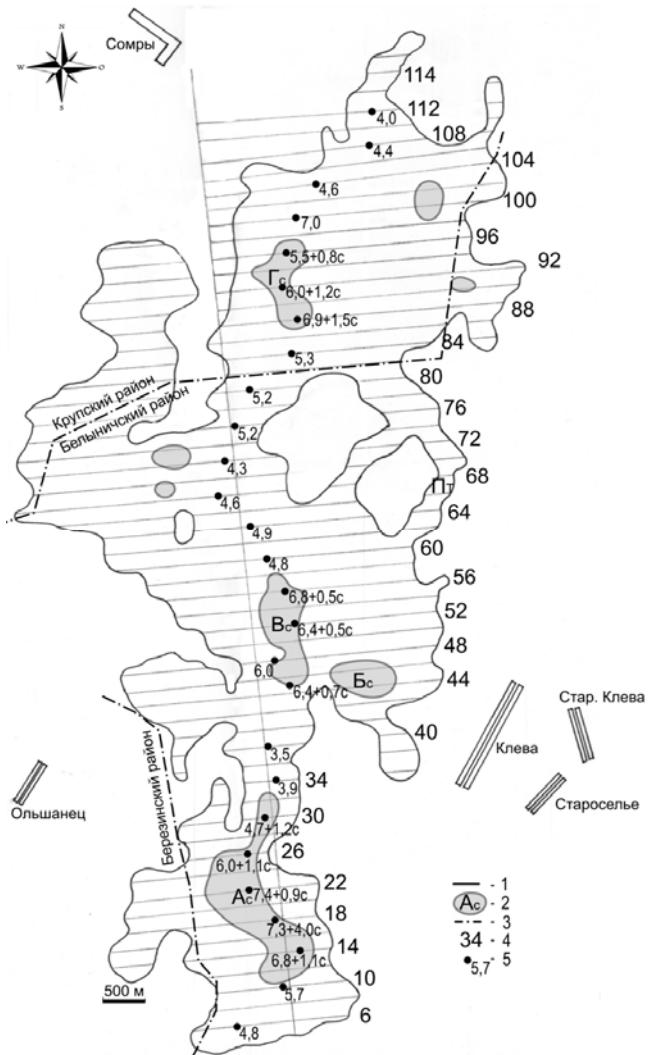


**Рис. 2. Распределение по территории Витебской области малых торфяных месторождений площадью до 10 га относительно участков моренных покровных пород (темные участки)**

**Fig. 2. Distribution of small peat deposits on the territory of the Vitebsk region with an area of up to 10 hectares relative to areas of moraine cover rocks (dark areas)**

Анализ вещественного состава придонных слоев торфа позволяет оценить степень участия грунтового питания исследованных торфяных месторождений на ранних этапах их развития. По мере увеличения глубины залегания придонного слоя на месторождении Славное уменьшается встречааемость верхового торфа с 85 % (глубина формирования – 0,7–2,0 м) до 45 % (глубина – более 5 м). На месторождении Есмоновский Мх на малых глубинах (до 2 м) относительная встречааемость верхового торфа в придонных слоях меньше и составляет 52 %, на глубинах более 5 м – только 3 %. Здесь превалируют низинные и переходные виды торфа – 31 и 66 % соответственно. Наибольшая средняя степень разложения (37,9 %) характерна для придонного слоя торфа месторождения Славное, отложившегося на глубине 4,1–5,0 м. Он представлен в основном пушицевым верховым и сфагновым переходным торфом. На месторождении Есмоновский Мх на данной глубине степень разложения торфа заметно ниже и составляет 26,2 %. Наиболее разложившийся торф на обводненном месторождении отложился позже, чем на месторождении Славное, а именно на глубине 3,1–4,0 м. Здесь его средняя степень разложения заметно меньше, чем на более возвышенном месторождении Славное, и составляет 32,5 %. Формирование в начале развития торфяной залежи низинных и переходных торфов при повышенном влиянии грунтовых вод способствует тому, что средняя зольность придонных слоев торфяной залежи Есмоновский Мх заметно повышена и составляет 14,2 %, в то время как на месторождении Славное она достигает 2,5 %.

Исследована морфометрия ложа месторождений Славное и Есмоновский Мох. Проанализировано 65 и 114 профилей зондирования залежей соответственно. На профилях выделены пункты с максимальной мощностью торфа. Отметки минерального дна (ложа торфяного месторождения) образуют на плане месторождения явно выраженную древнюю ложбину стока ледниковых вод, которая, по-видимому, сформирована в послеледниковое время в результате постоянного поверхностного оттока излишка воды по данной гидротехнической форме рельефа при интенсивном таянии Поозерского ледника (рис. 3).



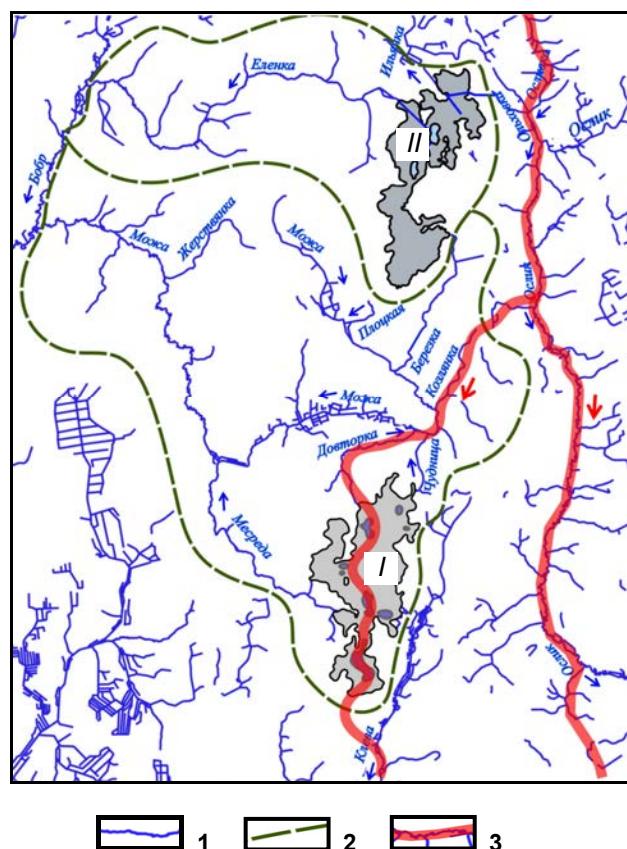
**Рис. 3. Схема размещения пунктов с максимальной мощностью торфа (генетических центрах) на профилях зондирования месторождения Есмоновский Мох:** 1 – граница торфа; 2 – контур залежи сапропеля; 3 – граница административных районов; 4 – номер поперечника; 5 – исследованные пункты с наибольшей мощностью торфа

**Fig. 3. Scheme of placement of points with the maximum thickness of peat (genetic centers) on the sounding profiles of the Esmonovsky Mokh deposit:** 1 – peat boundary; 2 – contour of the sapropel deposit; 3 – border of administrative regions; 4 – cross section number; 5 – explored points with the greatest thickness of peat

Современная гидросеть дает представление о направлениях поверхностного стока на водосборах месторождений Славное и Есмоновский Мох (рис. 4). Учитывая морфологию долин современных рек и глубину вреза их русел, можно предположить, что в конце плейстоцена основной поток поверхностных вод проходил транзитом через ложбину стока на месте месторождения Есмоновский Мох, ширина которой составляла от 200 до 350 м. В то время основная часть речного стока с севера по руслу современных рек Осливка, Ольховка и Ослик перенаправлялась по руслу на месте современных рек Козлянка и Чудница в ложбину стока, проходившей по центральной оси будущего торфяного месторождения Есмоновский Мох, а из нее – в древнюю протоку на месте среднего течения совре-

менной р. Клевы и далее в р. Березина. Об этом свидетельствует хорошо сохранившаяся под залежью торфа на торфяном месторождении Есмоновский Мокх древняя ложбина стока поверхностных вод.

На более высоком уровне рельефа, на котором размещается ложе месторождения Славное говорить о погребенной под торфом ложбине стока талых ледниковых вод не приходится, так как точки с максимальными мощностями торфа и минимальными абсолютными отметками минерального ложа здесь расположены хаотично, с большим разбросом в плане, что свидетельствует об ином, чем гидрогенное, происхождении рассматриваемых переуглублений.



**Рис. 4. Современная гидрографическая сеть водосборов торфяных месторождений Есмоновский Мокх (I) и Славное (II) и предполагаемое направление стока поверхностных вод в конце плейстоцена:**  
**1 – современная гидрографическая сеть; 2 – граница водосбора;**  
**3 – направление стока поверхностных вод в конце плейстоцена**

**Fig. 4. Modern hydrographic network of watersheds of peat deposits Esmonovsky Mokh (I) and Slavnoe (II) and the proposed direction of surface water runoff at the end of the Pleistocene:**  
**1 – modern hydrographic network; 2 – catchment boundary;**  
**3 – direction of surface water runoff at the end of the Pleistocene**

Анализ геологоразведочных материалов крупных болотных массивов изученного региона, таких как месторождения Славное, Есмоновский Мокх, Туршевка–Чертово, Острова Дулебы и других, позволяет заключить, что современные поверхности крупных по площади болотных систем верхового типа являются многовершинными, волнистыми и выпуклыми. Центры роста, как правило, смещены относительно первичных генетических центров и находятся на склонах бывших местных водоразделов болотных ландшафтов.

При малых врезах ложа (до 2–4 м) отмечается маломощный слой низинных торfov и раннее их замещение верховыми торфами или образование верховых торфов непосредственно на минеральном ложе месторождений, что в большей мере свойственно для залежи торфа возвышенного в рельефе месторождения Славное. С увеличением вреза ложа болотных ландшафтов возрастает его обводненность, заметно уменьшается количество пушицесодержащих торfov, уменьшается количество прослоек торфа повышенной степени разложения, понижается среднешурфовая величина степени разложения торфа. Эта закономерность характерна как для крупных верховых месторождений водоразделов (Славное), так и месторождений на более низких гипсометрических уровнях (Есмоновский Мокх).

С учетом полученной геологоразведочной информации по ключевым болотным массивам исследованной территории выделены основные этапы развития крупных олиготрофных болот, образованных путем заболачивания суходольных участков (стратотип Славное) и на месте древних озер (стратотип Есмоновский Мох). Критериями для выделения этапов развития олиготрофных болот являются климатические изменения, соответствующие им изменения типа торфонакопления, показатели зольности и степени разложения торфа. Весь период торфонакопления разделен на пять этапов: доголоценовый эвтрофный монофациальный (14–11,6 тыс. лет назад); мезо-эвтрофный в начале голоцене (10,7–9,3 тыс. лет назад); олиго-мезо-эвтрофный во время первого климатического максимума (10,7–9,3 тыс. лет назад); олиго-мезотрофный этап во время климатического оптимума (9,3–5,7 тыс. лет назад); современный олиготрофный этап, который начался более 5 тыс. лет назад.

**Ресурсы органического сапропеля под торфом.** Установлены закономерности заболачивания озерных водоемов и формирования запасов сапропеля под торфяными залежами. Анализ фоновых материалов показывает, что 517 торфяных месторождений (более 40 % от исследованных) образованы на месте древних водоемов и имеют в своем составе малозольные органические сапропели, которые приурочены в основном к средним частям разрезов и располагаются сразу под слоем торфа и ниже часто сменяются более зольным кремнеземистым и карбонатным сапропелем.

Для торфяных месторождений Витебской области, подстилаемых сапропелем, выявлена закономерность увеличения относительной доли объектов, прошедших озерную стадию при увеличении площади залежи низинного типа с 32 % для чисто верховых месторождений до 53 % для смешанных низинных с верховыми и переходными участками и 64 % для низинных месторождений.

Наибольшее количество торфяных месторождений с органическим сапропелем расположено в районах с органическим типом озерного осадконакопления, меньшее их количество встречено в районах с органосиликатным и органокарбонатным типом озерного осадконакопления. Различная результативность процесса осадконакопления в региональном плане и отличия в вещественном составе объясняются природной неоднородностью территории, что необходимо учитывать при определении стратегии освоения сапропелевых ресурсов в пределах крупных административно-территориальных единиц, таких как область и республика.

Для территории республики выполнен анализ распространения озер и погребенного под торфом сапропеля на крупных торфяных месторождениях с преобладающими запасами верхового торфа. Установлено, что в половине из них сапропелевая залежь концентрируется только в пределах водной акватории вторичных озер и не распространяется под торф. Проанализированы средние гипсометрические отметки поверхности торфяных месторождений с преобладанием верховых торфов и наличием озер, которые сравнивали с отметками расположенных поблизости рек-водоприемников. Во всех природных зонах выявлена закономерность: остаточные озера с простирающимися сапропеля под торф за пределы водной поверхности водоемов встречаются на торфяных месторождениях склонового залегания с незначительной, менее 10 м, разностью между поверхностью торфа и средним урезом воды в реке-водоприемнике. Современные озера с залежами сапропеля на этих торфяных болотах образованы раньше, чем нижние слои торфа. При разности отметок поверхности торфа и уреза в реке-водоприемнике более 10 м сапропелевая залежь практически не выходит за пределы водной поверхности озер на водораздельных торфяных месторождениях. Такие озера образованы после формирования нижних слоев торфяной залежи и являются вторичными.

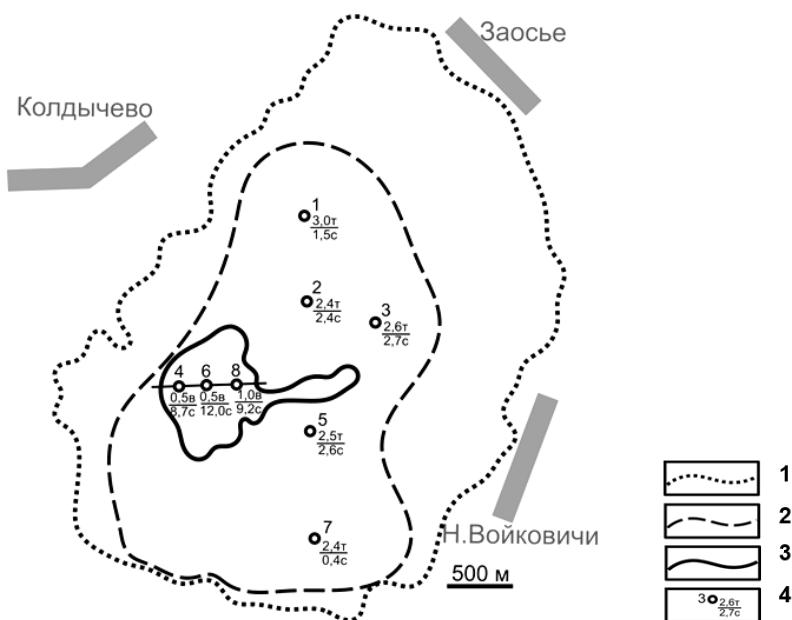
Предложен метод прогнозирования наличия сапропеля под торфяной залежью [9].

Для оценки влияния генетического центра месторождения на запасы озерно-болотных отложений исследовано распределение мощности сапропеля и перекрывающего его торфа на крупном озерно-болотном комплексе (ОБК) «Колдычевское-Корытино» в Барановичском районе Брестской области (рис. 5) [10]. Центром ОБК является котловина дистрофного озера Колдычевское, на 90 % заполненная сапропелем мощностью до 13 м. Площадь окружающего озеро торфяного месторождения Корытино составляет 1200 га, из которых 675 га занято сапропелевой залежью под торфом на месте бывшего озера. Для оценки изменения мощности сапропеля по мере удаления от генетического центра сапропелевая залежь разделена на девять кольцевых секторов, равноудаленных от генетического центра ОБК. В пределах площади каждого кольца рассчитана средняя мощность сапропеля и торфа.

Между средней мощностью сапропеля и удалением от генетического центра ОБК «Колдычевское-Корытино» выявлена отрицательная линейная корреляционная зависимость высокой силы ( $r = -0,85$ ). Зависимость средней мощности сапропеля от расстояния до генетического центра месторождения характеризуется двумя линиями регрессии: первое уравнение  $Y_6 = -0,016X_6 + 13,27$  используется для прогнозирования средней мощности сапропеля на небольшом (до 500 м) расстоянии от генетического центра месторождения. Второе уравнение регрессии  $Y_7 = -0,0017X_7 + 3,85$  применяется для прогнозирования средней мощности сапропеля под торфом на удалении от озера.

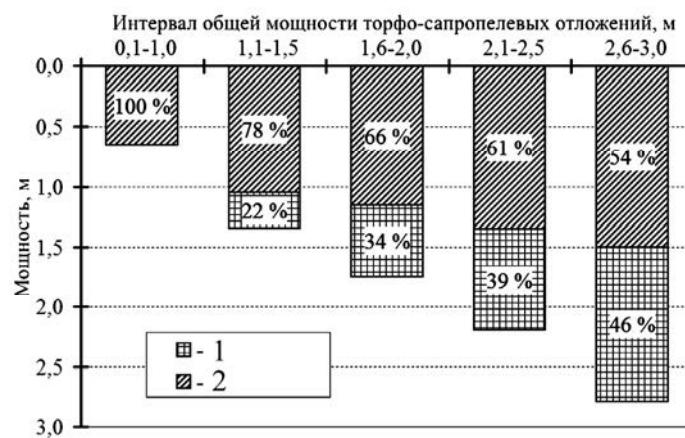
Для крупных торфяных месторождений полесского типа, образованных на месте древних озер-разливов, идентифицируемых по наличию озерных осадков, выявлена закономерность увеличения мощности сапропеля по мере роста общей глубины торфосапропелевых отложений (рис. 6) [11].

На мелкозалежных участках таких месторождений с глубиной до 1,0 м сапропель практически не встречается. На участках с общей мощностью отложений 1–2 м доля сапропеля в объеме осадков увеличивается до 29 %, а торфа снижается в среднем до 71 %. На участках с повышенной общей мощностью отложений (более 2 м) доля сапропеля в общей мощности увеличивается до 43 %.



**Рис. 5. Озерно-болотный комплекс «Колдычевское-Корытино»:**  
1 – граница залежи торфа; 2 – граница залежи сапропеля; 3 – граница озера;  
4 – пункты зондирования с глубиной воды (в), мощностью торфа (т) и сапропеля (с)

**Fig. 5. Lake and marsh complex "Koldychevskoe-Korytino":**  
1 – the boundary of the peat deposit; 2 – boundary of the sapropel deposit; 3 – lake boundary;  
4 – sounding points with water depth (c), peat thickness (t) and sapropel (c)



**Рис. 6. Соотношение мощности залежей торфа (1) и сапропеля (2) на участках торфяных месторождений с различной общей глубиной озерно-болотных отложений**

**Fig. 6. The ratio of the thickness of peat (1) and sapropel (2) deposits in areas of peat deposits with different total depths of lacustrine-marsh deposits**

В результате обработки материалов детальной разведки крупного торфяного месторождения Дубник Пинского района Брестской области площадью более 7600 га (295 пикетов) и данных по отдельным его участкам установлена прямая корреляционная связь высокой силы ( $r = 0,76$ ) между общей глубиной торфосапропелевых отложений и мощностью сапропеля, что позволяет прогнозно выявлять участки с промышленными запасами сапропеля по данным предварительных поисково-оценочных работ.

Создана электронная база данных ресурсов органического сапропеля всех торфяных месторождений Беларуси, которая включает общее количество ресурсов озерных осадков на торфяном месторождении, соотношение торфа и подстилающего сапропеля, выдержанность последнего по простиранию, а также характеристики его вещественного состава.

По фондовым и архивным материалам Минприроды и Министерства энергетики Республики Беларусь, Института природопользования НАН Беларуси выполнены анализ и оценка ресурсов органического сапропеля, залегающего на выбывших из эксплуатации торфяных месторождениях. Установлено, что геологическими разведками различных категорий выявлено 224 выбывших из эксплуатации торфяных месторождений с общими запасами органического сапропеля 162 592 тыс. м<sup>3</sup> [12].

Разработана классификация торфосапропелевых месторождений с органическим сапропелем в структуре его запасов. Классификация является генетической, так как учитывает происхождение осадков, внутренние, региональные и глобальные условия их формирования. Она отражает продолжительность, масштабы и продуктивность седиментации повышенных количеств органического вещества на озерной стадии развития озерно-болотного комплекса по сравнению с болотным этапом. Критериями классификации являются трофность месторождения торфа и среды формирования осадков, главные источники осадочного вещества древних озер, специфика напластования залежи, объем накопившихся сапропелей в сравнении с объемом торфа. По критериям классификации выполнена систематизация торфосапропелевых месторождений по главному фактору – источнику осадочного вещества сапропеля. Показано, что наиболее ценными для практического использования являются те месторождения, в которых превалирует биогенный источник формирования сапропеля. На территории республики насчитывается 101 объект данного типа с запасами более 71 млн м<sup>3</sup>, где залежь представлена только органическим сапропелем или он существенно (более 80 % объема) преобладает в структуре запасов.

Ценными для освоения являются также торфосапропелевые месторождения, в которых наряду с ведущим по объему биогенным источником осадочного вещества (более 50 %) подчиненную роль играют терригенный и хемогенный факторы осадконакопления. Таких объектов на территории республики насчитывается 137 с общими запасами сапропеля 210 млн м<sup>3</sup>. Выявленные и систематизированные по фондовым источникам ресурсы органического сапропеля на ненарушенных и выработанных от торфа месторождениях позволяют существенно расширить сырьевую базу для производства различной продукции из сапропеля, прежде всего местных органоминеральных удобрений и целенаправленно выбирать объекты для добычи.

**Освоение сапропелевых и смешанных торфяно-сапропелевых месторождений.** Выявленное разнообразие природы сапропеля и торфа обусловили широкие возможности их использования и множественность вариантов их извлечения и переработки. Применяемые в настоящее время технологическая схема и оборудование для добычи торфа фрезерным способом предусматривают целый шлейф узкоспециализированного металлоемкого оборудования для подготовки месторождения к эксплуатации, собственно самого оборудования для добычи торфа и его сушки, а также оборудования для ремонта и поддержания в работоспособном состоянии достаточно больших площадей. Фрезерный послойно-поверхностный способ добычи не позволяет извлекать торф из залежи в полном объеме (после выработки месторождения остается не менее 50 % сырья), имеет сезонный характер и значительную зависимость от погодных условий, так как предполагает полевую сушку насыщенного влагой торфа. Добыча фрезерного торфа также влечет за собой значительные природоохранные риски при осушении месторождения и характеризуется сбросом гумифицированных вод, а также нагрузкой на атмосферу, связанной с пылением и ростом рисков возникновения пожаров.

Весьма перспективным технологическим решением является добыча кускового торфа для целей его комплексного использования и, в том числе, создания производства активированных углей. С учетом основных факторов, влияющих на экономические, технологические, экологические и другие особенности производства активированных углей и торфяной продукции комплексного назначения, разработаны методы выбора сырьевой базы для организации выпуска указанных видов продукции, позволяющие в 2–3 раза снизить трудозатраты по сравнению с общепринятым способом.

Выбор торфа и сапропеля для получения продуктов глубокой переработки должен проводиться на основании учета информации о составе сырья, потребности региона или республики в конкретной продукции, а также гидрологических, технологических, экологических и других показателей. Предложен интегральный показатель пригодности торфа для комплексной переработки – метод приведения

разноименных показателей в единую систему с помощью так называемой функции желательности, который положен в основу методики выбора первоочередного участка или объекта при определении сырьевых баз для новых производств.

При научном сопровождении Института природопользования НАН Беларусь для создания производства по комплексной переработке выбрано перспективное предприятие по добыче торфа ОАО «Туршовка» ГПО «Белтопгаз» Министерства энергетики Республики Беларусь. На эксплуатируемом предприятием торфяном месторождении «Туршевка–Чертово» установлены мощность и вещественный состав верхового торфа высокой степени разложения. Определены балансовые запасы торфа, пригодные для производства активированных углей, которые составляют 1498 тыс. т при условной влажности 40 %.

Обоснован и разработан технологический регламент для получения кускового торфа как сырья для выпуска активированных углей. Установлены качественные характеристики куска диаметром 40 мм, режимы и характеристики производства, рассчитаны технико-экономические показатели производства (скорость сушки, цикловый сбор, продолжительность и количество циклов, сезонный сбор и др.). Разработаны рекомендации по производству кускового торфа.

Применительно к сырьевой базе ОАО «Туршовка» организован опытный участок по добыче кускового торфа и показано, что получаемый кусковой торф удовлетворяет действующим нормативным документам, в том числе по важнейшему показателю – адсорбционной способности. Однако не представляется возможным без связующих компонентов получить из него дробленый уголь с пределом прочности при истирании не менее 70 %.

Исследование влияния условий сушки кускового торфа разного размера (диаметром 100 и 40 мм) на его прочность и насыпную плотность показывает, что кусок малого диаметра обладает меньшей склонностью к трещинообразованию, более плотной структурой и увеличенной прочностью на сжатие. Формование более плотной исходной продукции (пеллеты диаметром 10 и 20 мм) увеличивает насыпную плотность и прочность получаемых активированных углей, но приводит к ухудшению сорбционных характеристик углей в области микро- и мезопор.

Разнообразные условия залегания сапропеля в озерах и под слоем торфа, физические характеристики сапропелевой залежи обусловили многообразие технических и технологических решений при освоении месторождений сапропеля [13]. Добыча сапропеля свойственна многооперационность, которая включает нарушение целостности залежи сапропеля, подъем на поверхность, перемещение (циклически и поточно), удаление избытка влаги и дальнейшую переработку для получения готовой продукции. Для этого используются разнообразные заборные устройства механического, гидравлического, пневматического и гидромеханического типов. Анализ способов добычи и обезвоживания торфа и сапропеля показывает, что применяемые для этого технические средства характеризуются свойственной добывающим отраслям промышленности инерционностью применения, разработаны из расчета крупномасштабной добычи (более 40–60 тыс. т в год). При меньшем объеме добычи, на которые ориентированы современные предприятия различной формы собственности, такое оборудование экономически не эффективно.

Анализ специфики залегания торфяных и сапропелевых месторождений в Лельчицком районе Гомельской области и Пружанском районе Брестской области, положительный опыт их освоения при научном сопровождении Института природопользования НАН Беларусь показывают, что особое внимание нужно обратить на выбывшие из эксплуатации торфоучастки, где под незначительным остаточным слоем торфа залегает сапропель.

При современном подходе с повышенными экологическими требованиями к технологиям добычи торфа и сапропеля необходимо обеспечить максимальную извлекаемость сырья, возможность применения универсальной технологии с максимальным использованием серийно выпускаемой сельскохозяйственной и дорожностроительной техники, круглогодичность проведения добывочных работ на осваиваемых объектах, снижения затрат на подготовку месторождения к эксплуатации.

Сформулированы современные требования к организации разработки совместно залегающих торфа и сапропеля, которые предусматривают возможность работы технологического оборудования на неосушенных торфяных месторождениях, селективность извлечения сапропеля и торфосапропеля, круглогодичность проведения работ, независимость от погодных условий, совмещение технологических операций или расширение функций комбинированных агрегатов (преобразование многооперационных процессов в малооперационные), снижение количества технических средств, поточность, а не циклическость технологических операций, применение современных средств для транспортирования добытого сырья. Ограничения на эти требования накладывают техническая возможность, экологическая допустимость и экономическая целесообразность принимаемых технических и технологических решений.

Современным тенденциям успешного освоения ресурсов сапропеля и торфосапропеля отвечают технологии скважинной гидродобычи. Разработанные В. Ж. Аренсом [14] для глубокозалегающих и обводненных россыпных месторождений полезных ископаемых указанные технологии применяются ограниченно. Для торфа и сапропеля скважинная гидродобыча предлагается Б. А. Богатовым [15], В. И. Косовым [16] и С. И. Штином [17]. При поиске технических решений по применению скважинного способа для добычи торфа и сапропеля особое внимание привлекают финский многофункциональный земснаряд-амфибия Watermaster и его российский аналог. При извлечении торфа и сапропеля из-под слоя воды весьма перспективным представляется применение пневматических камерных насосов, что подтверждается положительным опытом их использования для добычи сапропеля естественной влажности [18].

В настоящее время для отработки возможности скважинной добычи сапропеля в Институте природопользования НАН Беларуси научно обоснована технологическая схема извлечения полезного ископаемого, проводятся маркетинговые исследования и подбор оборудования для создания опытных участков по отработке новой технологии добычи. Для этого исследованы несколько месторождений, в том числе Цинцевичи Вилейского района, Дукора и Долгое, Гала-Ковалевское с карбонатным и Кобылицкое с кремнеземистым и органическим сапропелем в Пуховичском районе Минской области.

С использованием вискозиметра «Полимер РПЭ-1М» изучены реологические свойства образцов карбонатного, кремнеземистого, органического сапропеля, торфосапропеля и их водных суспензий на опытных участках месторождений Гала-Ковалевское и Кобылицкое в диапазонах влажности 64–97 %, зольности 6–50 % и карбонатов кальция 3–45 % на сухое вещество. В указанных пределах изменения установлена регрессионная зависимость между статическим  $\tau_{k_1}$  и динамическим  $\tau_{k_2}$  условными пределами текучести и соответствующим им напряжением сдвига сапропелевых систем  $\tau_{k_2} = 1,4\tau_{k_1}$  ( $r = 0,9$ ). Также получена регрессионная зависимость, связывающая динамический условный предел текучести с соответствующими ему влажностью и зольностью сапропеля:

$$\tau_{k_2} = 10^{(0,462(100-w)/(1+0,083A^c))},$$

где  $w$  и  $A^c$  – влажность и зольность сапропеля соответственно, %.

Полученные новые данные по структурно-реологическим свойствам сапропеля, торфосапропеля и их водных суспензий необходимы для обоснования, расчета и выбора технических средств нового скважинного способа добычи сапропеля из-под слоя торфа.

**Переработка торфа и сапропеля.** В связи с новыми направлениями использования торфа и сапропеля дальнейшего совершенствования требует система подготовки добытого сырья для переработки, а также разработка технологических принципов его модификации с применением эффективных методов воздействия для придания полезных свойств и повышения качественных параметров конечной продукции.

Для удаления избытка влаги из сапропеля представляется перспективным использование специальных фильтрующих текстильных контейнеров – геотубов, прикладные инженерные вопросы применения которых хорошо разработаны [19]. Изучение закономерностей полевой сушки сапропеля позволило нам предложить метод расчета ее продолжительности, который учитывает природные (состав и свойства сапропеля, погодные условия) и технологические (толщина слоя и характер воздействий) факторы в широких диапазонах их изменения.

Проведены эксперименты по возможности переработки торфа и сапропеля методами «взрывного автогидролиза» (ВА), ультразвуком (УЗ) и в аппарате вихревого слоя (АВС).

При ВА разрушающие частицы нагрузки действуют не от периферии к центру, а изнутри. Здесь пропитанная жидкостью частица органического материала подвергается воздействию высоких температур при повышенном давлении, препятствуя переходу жидкости в парообразное состояние.

Установлено, что при электрогидроимпульсном воздействии на обводненные образцы торфа и сапропеля под действием электрического разряда в разной степени меняется химический состав как жидкой, так и твердой фазы вещества. Эти изменения зависят от вещественного состава исследованных каустобиолитов, продолжительности ЭГ-воздействия, степени разбавления образцов водой при электроимпульсной обработке. Также в составе жидкой фазы торфа и сапропеля увеличиваются цветность, общая минерализация, содержание азота, что установлено в результате выделения и анализа разных функциональных групп ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_3^-$  или  $\text{NO}_2^-$ ). В составе твердой фазы образцов торфа содержание водорастворимых веществ после электрогидроимпульсного воздействия падает

в 1,07–1,14 раза, выход щелочнорастворимых веществ и содержание гуминовых кислот сокращаются в среднем на 7–18 %.

При электрогидроимпульсной обработке органического сапропеля содержание гуминовых веществ в его составе сокращается на 6–12 % при одновременном увеличении содержания собственно гуминовых кислот на 12–14 %. В случае образцов кремнеземистого сапропеля наблюдается увеличение содержания в их составе как гуминовых веществ (на 4–10 %), так и гуминовых кислот (на 3–28 %) в зависимости от видовой принадлежности образца и условий обработки.

По данным ИК-спектроскопии, в химическом составе как торфа, так и сапропеля при электрогидроимпульсной обработке изменяется содержание гидроксильных, карбоксильных, фенольных, метильных и метиленовых групп, количество ароматических структур и полисахаридов, хотя эти изменения не столь значительные, как ожидалось.

Электрогидроимпульсная обработка органического и кремнеземистого сапропеля в течение 4–8 мин приводит к так называемому бактериальному взрыву – степень микробной обсемененности образцов возрастает на 3–4 порядка, что может иметь важное значение при выпуске новых форм органических удобрений.

Получена модель воздействия ультразвука частотой 37 кГц и максимальной мощностью 240 Вт на торфосапропелевую смесь в виде порошка, обеспечивающая возможность анализа влияния характеристик приготовленных препаратов:

$$Y_1(K_n) = 0,51 - 0,26X_1 + 0,28 X_2 + 0,24X_3,$$

где  $Y_1(K_n)$  – параметр оптимизации (коэффициент длины проростков);  $X_1$  – содержание в смеси торфа, %;  $X_2$  – влажность смеси, %;  $X_3$  – время воздействия ультразвуком, мин.

Анализ влияния ультразвука и основных характеристик приготовленных торфосапропелевых суспензий на биологическую активность проростков пшеницы показывает:

- увеличение биологической активности (агрономической эффективности) на 30–40 %. Уровень этого увеличения определяется тремя основными характеристиками образцов суспензий этих смесей;

- повышение концентрации органического вещества в пределах 0,028–0,70 % в суспензии торфосапропелевой смеси при добавлении в растительном teste в объеме 10 мл приводит к снижению рассчитанной урожайности в лабораторном эксперименте на 75 % достоверности;

- увеличение времени воздействия ультразвука на образцы суспензий торфосапропелевых смесей в пределах 3–20 мин повышает урожайность исследуемых образцов с достоверностью только 75 мас.% проростков и корней в растительном teste;

- снижение доли торфа в торфосапропелевой смеси до уровня 70–50 % повышает урожайность суспензий на их основе с достоверностью 75–100 мас.% проростков и корней в растительном teste.

Ударное взаимодействие врачающегося электромагнитного поля, создаваемого индуктором при частоте тока 50 Гц, с вихревым слоем обрабатываемой суспензии и с внесенными в нее ферромагнитными иголками на АВС производства ООО «Аппарат-НН» (Нижний Новгород) обеспечивает активное диспергирование исходного торфа и сапропеля, которое сопровождается прохождением акустических волн высокой частоты и кавитационными явлениями. Обработка на АВС органического сапропеля в течение 5 мин снижает содержание фракции крупнее 50 мкм в 6,5 раза по сравнению с исходным образцом (с 24 до 3,7 %), а кремнеземистого сапропеля – в 15 раз (с 57 до 3,8 %). Степень дисперсности низинного торфа в течение 5 мин сопоставима с таковой для сапропеля, а степень дисперсности верхового торфа заметно меньше.

Диспергирование сапропеля и торфа механоактивацией АВС существенно снижает реологические параметры и увеличивает содержание фракций менее 50 мкм. Дисперсии становятся более текучими, снижаются значения статического и динамического напряжений сдвига, одновременно растут значения пластической и динамической вязкостей. Уже после двухминутной обработки исследуемых дисперсий в АВС напряжения сдвига снижаются в 2 раза и дальнейшая их обработка в течение 5 и 10 мин изменяет эти характеристики незначительно. Аналогичное изменение реологических параметров свойственно также торфу.

При воздействии переменного магнитного поля на торфосапропелевую суспензию наблюдается незначительное колебание значений pH. Увеличивается содержание органического вещества: его количество возрастает на 6,8–7,2 % при обработке 3 мин и на 8,2–8,7 % – при обработке 10 мин. Можно предположить, что воздействие переменного магнитного поля разрушает органоминеральные связи, что приводит к возрастанию содержания органического вещества.

Обработка образцов водных торфосапропелевых суспензий в АВС заметно увеличивает содержание водорастворимых веществ: чем продолжительнее по времени воздействие, тем значительнее увеличение их содержания. Так, при воздействии на образец переменным магнитным полем

в течение 3 мин количество водорастворимых веществ возрастает в 1,7–2,7 раза, а при воздействии в течение 10 мин – в 4,3–7,2 раза.

Обработка торфосапропелевых супензий в АВС и совместно АВС + УЗ практически не влияет на ИК-спектры супензий. Фильтраты супензии после ее обработки АВС и АВС + УЗ характеризуются более низкой оптической плотностью в видимой области спектра и меньшей степенью ароматичности органического вещества. Это можно объяснить как возникновением в процессе обработки активных соединений с их последующей полимеризацией, так и образованием ферромагнитных комплексов с водорастворимыми соединениями при АВС обработке, поскольку в процессе такой обработки происходит истирание рабочего тела (иголок) аппарата.

Растительными тестами по прорашиванию проростков пшеницы озимой при соотношениях грунт : супензия 50 : 50 и 70 : 30 установлен значительный прирост по средней длине к контролю: для первой серии опытов (50 : 50) наблюдается прирост от 53,1 до 114,4 % по надземной части и от 4,4 до 31,0 % по корневой части растений. При соотношении песок : супензия 70 : 30 прирост составляет от 47,6 до 80,4 % и от 4,9 до 53,8 % для надземной и подземной части соответственно.

Препарат при соотношении торф : сапропель 80 : 20, гидромодуле 1 : 15 и 17%-ной щелочи после обработки и центрифугирования содержит 3,3–4,6 % сухого и 2,3–3,3 % органического вещества в расчете на препарат, 66–69 % гуминовых кислот на сухое вещество, pH 9,0–10,0, что меньше, чем в препаратах, полученных в результате классического способа щелочного гидролиза в реакторе (типа ТОСАГУМ) [20].

Исследование биологической активности полученного препарата в вегетационном опыте на кукурузе методом водных культур, где в качестве контроля использована смесь Прянишникова, а в эксперименте – дополнительная добавка 0,004 % препарата, полученного при различном времени обработки торфосапропелевой смеси на АВС, показывает, что наилучший результат по биологической активности (для сухой массы растений) показал препарат, полученный после 16 мин обработки в АВС. Для надземной части кукурузы прирост к контролю составил 41,0 %, для подземной части – 60,8 %. Препараты, полученные после 8 и 20 мин обработки в АВС, показали несколько меньший прирост по отношению к контролю.

При совместном воздействии ультразвука и переменного магнитного поля на торфосапропелевые супензии наблюдается шестикратное увеличение содержания водорастворимых веществ при непродолжительной обработке (2–3 мин). При кратковременной обработке в аппарате вихревого слоя торфосапропелевые супензии, предварительно облученные ультразвуком, демонстрируют увеличение содержания гуминовых веществ на 11,4–11,9 % по сравнению с образцами, которые подобному воздействию не подвергались. При увеличении до 10 мин времени обработки в вихревом слое образцов, предварительно обработанных ультразвуком, увеличение выхода гуминовых веществ снижается до 3,0–8,8 %.

Результатом исследований стали рекомендации по применению ультразвука и механоактивации в переменном магнитном поле при производстве торфосапропелевых биологически активных препаратов.

В рамках изучения свойств продуктов из торфа проведены экспериментальные работы по регулированию водопоглотительной способности топливных гранул на основе торфа и растительных отходов сельскохозяйственного производства. Определены границы содержания влаги в гранулах на основе торфа в равновесном состоянии. Установлена зависимость изменения массовой доли равновесной влаги в гранулах с различным соотношением торфа и древесных отходов при нахождении их в навалах под навесом, что дает возможность прогноза содержания влаги продукции при хранении и транспортировке.

Проведено теоретические обоснование новых направлений использования сапропеля и гуминовых препаратов из него в качестве диспергаторов и дефлокулянтов керамических шликеров при производстве керамических изделий. Экспериментальные образцы щелочных гуминовых гидролизатов из сапропеля с повышенным содержанием аморфного кремнезема испытаны в керамических шликерах завода «Стройфарфор» ОАО «Керамин» путем ввода по равнозначной массе в составе разжижителей (электролитов) вместо импортируемого углешелочного реагента (УЩР). Установлено, что наилучшими разжижающими свойствами обладает гуминовый препарат из диатомового органического сапропеля озера Святое Рогачёвского района Гомельской области. В заключении испытательной лаборатории завода «Стройфарфор», полученном в результате лабораторного тестирования гуминового препарата из сапропеля в качестве электролита для фарфорового шликера отмечается, что реологические характеристики шликера, приготовленного с использованием испытанного гумата, сопоставимы с реологическими параметрами производственного фарфорового шликера, на основе УЩР. Данный гуминовый препарат может быть использован в качестве альтернативной замены импортируемого УЩР в комплексе электролитов для приготовления фарфорового шликера.

Проведена серия экспериментов по обработке на роторно-импульсном аппарате малозольного органического сапропеля в водной и щелочной средах при температурах 50 °С и 80 °С. Определена биологическая активность полученных препаратов в растительном тесте на ячмене. По биологической активности препараты располагаются в ряд: натриевая форма > аммониевая ≥ калиевая. Достаточно высокой биологической активностью обладает препарат, полученный обработкой сапропеля в водной среде. Прирост зеленой массы зерновых культур максимален для препарата, полученного механохимической обработкой сапропеля в присутствии NaOH при 80 °С, и достигает 24 %.

**Применение результатов научных исследований.** Продолжением научных исследований стал цикл прикладных работ. В 2018–2022 гг. Институтом природопользования НАН Беларусь в целях освоения месторождений сапропеля и торфа и создания производств предприятиями различной формы собственности выполнены детальная разведка и доразведка в озерах Червоное Житковичского района Гомельской области, Лочинское Осиповичского района Могилёвской области, Слижовское Мостовского района Гродненской области, участков торфяных месторождений «Млынок-2» Пружанского района Брестской области, «Нивское» Кличевского района Могилёвской области, «Дубник-2» Пинского района Брестской области, «Крупка» Лельчицкого района Гомельской области. Выполнено обоснование границ горного отвода для добычи сапропеля в озерах Добеевское Шумилинского района и Жеринское Чашникского района Витебской области, Сущево Мостовского района Гродненской области, Олтушское Малоритского района Брестской области, Червоное Житковичского района Гомельской области. Для Белорусской национальной биотехнологической корпорации (БНБК) выявлены сырьевые базы сапропеля в Пуховичском и сопредельных районах для использования в качестве сырья для стимулирующих рост кормовых добавок и создания инновационной продукции. Выполнены прикладные работы по оценке состояния и осадки торфяной залежи ее при осушении и создании насыпного основания для жилой застройки в пределах торфяного массива в районе Заславского водохранилища.

**Заключение.** Таким образом, получены новые знания по структуре запасов и качеству торфяного сырья, сосредоточенного в районе действующих предприятий по добыче торфа, что позволяет разработать и предложить торфодобывающей промышленности научно обоснованную методологию выбора перспективных для доразведки и освоения торфяных площадей на ближайшую и дальнюю перспективу.

Для выбора перспективных для комплексной глубокой переработки торфа месторождений, в том числе из перечня зарезервированных, выявлены природные особенности развития таких месторождений, объяснен генезис сформированных залежей, обоснованы методы и критерии выделения наиболее перспективных участков для первоочередного освоения с целью выпуска торфяной продукции комплексного назначения.

Установленная закономерность приуроченности малых торфяных месторождений площадью до 10 га к моренным отложениям позволяет прогнозировать площади повышенной концентрации таких месторождений, что может быть использовано для определения целесообразности их освоения, и обоснования мероприятий по охране.

Рассчитанная зависимость изменения средних значений основных общетехнических характеристик (зольность и степень разложения) торфа и его глубины в торфяных месторождениях по административным областям республики в зависимости от географической широты важна для обоснования и выбора крупных республиканских сырьевых баз по добыче и переработке торфа для нужд энергетики и сельского хозяйства.

Выполненные исследования имеют важное значение для оценки генезиса и закономерностей формирования вещественного состава торфяных залежей крупных месторождений Беларусь, таких как Славное и Есмоновский Мох, на сырьевой базе которых проведены испытания и выпуск опытных партий разнообразной продукции по заданию 1.7 «Выполнить оценку состава и свойств сырья перспективных для глубокой комплексной переработки торфяных месторождений и разработать номенклатурный перечень продукции, рекомендуемой к производству» ГНТП «Природопользование и экологические риски».

Изучены месторождения органического сапропеля, залегающего под торфяными залежами. Выявлено 224 таких объектов с общими запасами органического сапропеля более 160 млн м<sup>3</sup>.

На примере крупного озерно-болотного комплекса «Колдычевское-Корытино» Барановичского района Брестской области определены взаимосвязи средней мощности сапропеля в зависимости от расстояния до генетического центра, получены уравнения регрессии для прогнозной оценки мощности сапропеля под торфом.

Предложены методические приемы и интегральный показатель пригодности торфа для комплексной переработки путем приведения рациональных показателей в единую систему с помощью функции желательности, положенной в основу методики выбора первоочередной сырьевой базы.

Установлены оптимальные характеристики кускового торфа для производства активированных углей, определены качественные характеристики и технологические показатели кускового сырья, разработаны технологический регламент, технические условия и рекомендации на добычу кускового торфа для производства активированных углей. На базе разрабатываемого торфяного месторождения «Туршевка–Чертово» создан опытный участок по добыче кускового торфа.

Выполняется научное обоснование скважинного способа добычи сапропеля из-под торфа. Для отработки возможности добычи по такой технологии выявлены перспективные для создания опытного участка объекты – месторождения Гала-Ковалевское и Кобылицкое Пуховичского района Минской области. Изучение сапропеля этих месторождений позволило установить регрессионные зависимости, связывающие реологические и общетехнические свойства сапропеля, что важно для расчета и выбора технических средств добычи. Разработан метод расчета продолжительности полевой сушки сапропеля.

Получены новые данные, которые показывают изменение свойств сапропеля при воздействии на него «взрывным» автогидролизом, ультразвуком и в аппарате вихревого слоя. Электроимпульсная обработка сапропеля приводит к так называемому бактериальному взрыву. Обработка сапропеля ультразвуком и в аппарате вихревого слоя увеличивает его биологическую активность в лабораторных экспериментах на 30–40 %.

#### Список использованных источников

1. Лиштван, И. И. Этапы становления и развития науки о торфе и сапропелях / И. И. Лиштван, Л. С. Лис // Природопользование. – 2018. – № 2. – С. 6–21.
2. Исследования по торфу и сапропелю Института природопользования НАН Беларуси на службе экономики Республики Беларусь / И. И. Лиштван [и др.] // Природопользование, 2018. – № 1. – С. 6–25.
3. Перспективы производства в Республике Беларусь активированных углей на основе кускового торфа / И. И. Лиштван [и др.] // Химия и химическая технология переработки растительного сырья : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. проф. В. М. Резникова / редкол.: И. В. Войтов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГТУ, 2018. – С. 217–222.
4. Перспективы использования торфа месторождений с особо цennыми видами сырья для получения продукции комплексной биотермохимической переработки / И. И. Лиштван [и др.] // Альтернативные источники сырья и топлива : тез. докл. VII Междунар. науч.-техн. конф. посвящ. 150-летию Периодической таблицы хим. элементов Д. И. Менделеева, Минск, 28–30 мая 2019 г. – Минск : Беларусская наука, 2019. – С. 70–71.
5. Курзо, Б. В. Районирование территории Беларуси по пригодности запасов торфа и залегающего совместно с ним сапропеля для выпуска продукции комплексного назначения / Б. В. Курзо, А. В. Краковецкий // Природопользование. – 2018. – № 1. – С. 176–189.
6. Макаренко, Т. И. Рациональное освоение торфяных месторождений Республики Беларусь / Т. И. Макаренко // Материалы по изучению русских почв : сб. науч. докл. / под ред. Б. Ф. Апарина. – СПб., 2017. – Вып. 9 (36). – С. 211–214.
7. Makaranka, T. The scheme of distribution of peatlands in the directions of use / T. Makaranka, M. Kudrevich // Book of Abstracts Symposium International Peatlands Society 50 years. Scientific Sessions, Thursday, September 13, 2018 / Wageningen Environmental Research ; ed. J. J. H. van den Akker. – Netherlands, 2018. – P. 71.
8. Лис, Л. С. Изменение характеристик торфяных месторождений Республики Беларусь в зависимости от географической широты / Л. С. Лис // Природопользование. – 2020. – № 1. – С. 108–114.
9. Курзо, Б. В. Прогноз наличия сапропеля под торфяной залежью / Б. В. Курзо, О. М. Гайдукевич // Инновационные технологии в мелиорации: опыт, стратегия, приоритеты (Скоропановские чтения) : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 110-летию Ин-та мелиорации и 110-летию со дня рожд. акад. С. Г. Скоропанова, Минск, 5–6 нояб. 2020 г. – Минск, 2021. – С. 261–265.
10. Оценка состава сапропеля озерно-болотного комплекса «Колдычевское–Корытино» для выбора направлений его использования / О. М. Гайдукевич [и др.] // Актуальные проблемы наук о Земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 27–29 сент. 2021 г. : в 2 ч. / редкол. С. А. Лысенко [и др.]. – Брест, БГУ, 2021. – Ч. 2. – С. 87–90.
11. Курзо, Б. В. Особенности формирования и использования ресурсов сапропеля в западной и восточной частях Белорусского Полесья / Б. В. Курзо, А. Ю. Татков, О. М. Гайдукевич // Прыроднае асяродзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця : зб. навук. прац X Міжнар. навук. канф. «Прыроднае асяродзе Палесся і навукова-практычныя аспекты рацыянальнага рэсурсакарыстання», Брест, 14–16 верас., 2022 г. / Нац. акад. навук Беларусі, Палескі аграрна-экалагічны інстытут ; рэдкал.: М. В. Міхальчук (гал. рэд.) [і інш.]. – Брест : Альтэрнатыва, 2022. – Вып. 14. – С. 48–54.
12. Обоснование выбора сырьевой базы органического сапропеля для разработки / В. Б. Кунцевич [и др.] // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 146–156.
13. Курзо, Б. В. Учет технологических и экологических факторов при разработке месторождений сапропеля / Б. В. Курзо, О. М. Гайдукевич // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных

- недр : материалы 4-й Междунар. науч. школы акад. К. Н. Трубецкого / ИПКОН РАН ; под ред. акад. РАН К. Н. Трубецкого. – М., 2020. – С. 299–303.
14. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых / В. Ж. Аренс [и др.]. – М. : Горная книга, 2007. – 291 с.
  15. Богатов, Б. А. Перспективы скважинной добычи полезных ископаемых в Беларусь / Б. А. Богатов, В. С. Войтенко, А. М. Киреев. – Минск : Технопринт, 2004. – 257 с.
  16. Косов, В. И. От геоэкологии до нанотехнологий. Композитные строительные и топливно-энергетические материалы из органогенных горных пород и отходов / В. И. Косов, А. П. Золотухин. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 368 с.
  17. Штин, С. М. Гидромеханизированная технология разработки торфо-сапропелевых месторождений с получением органо-минеральных удобрений и биотоплива / С. М. Штин // ГИАБ, отд. вып. № 1, Гидромеханизация. – М. : Горная книга, 2009. – С. 63–68.
  18. Дементьев, В. А. Эксплуатация обводненных месторождений / В. А. Дементьев ; под ред. И. М. Ялтанца. – М. : Горная книга, 2010. – 204 с.
  19. Волосухин, В. А. Преимущества геотекстильных контейнеров перед средствами обезвоживания донных отложений в илохранилищах / В. А. Волосухин, А.С. Кравченко // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). – 2015. – № 7 (16). – С. 48–51.
  20. Использование торфа и сапропеля для получения гуминового регулятора роста растений / Б. В. Курзо [и др.] // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 136–145.

### References

1. Lishtvan I. I., Lis L. S. *Etapy stanovleniya i razvitiya nauki o torfe i sapropelyah* [Stages of formation and development of the science of peat and sapropels]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2018, no. 2, pp. 6–21. (in Russian)
2. Lishtvan I. I., Tomson A. E., Bambalov N. N., Naumova G. V., Brovka G. P., Kurzo B. V., Rakovich V. A. *Issledovaniya po torfu i sapropelyu Instituta prirodopol'zovaniya NAN Belarusi na sluzhbe ekonomiki Respublikii Belarus'* [Research on peat and sapropel of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus in the service of the economy of the Republic of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2018, no. 1, pp. 6–25. (in Russian)
3. Lishtvan I. I., Tomson A. E., Kuncevich V. B., Caryuk T. Ya. *Perspektivy proizvodstva v Respublike Belarus' aktivirovannyh uglej na osnove kuskovogo torfa* [Prospects for the production of activated carbons based on sod peat in the Republic of Belarus]. *Materialy mezhd. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhd. prof. V. M. Reznikova "Himiya i himicheskaya tekhnologiya pererabotki rasititel'nogo syr'ya"* [Proc. Int. sci.-tech. conf., dedicated 100th anniversary of the birth of prof. V. M. Reznikova "Chemistry and chemical technology for processing vegetable raw materials"]. Minsk, BSTU, 2018, pp. 217–222. (in Russian)
4. Lishtvan I. I., Kurzo B. V., Gajdukevich O. M., Navosha Yu. Yu. *Perspektivy ispol'zovaniya torfa mestorozhdenij s osobu cennymi vidami syr'ya dlya polucheniya produkciyi kompleksnoj biotermohimicheskoy pererabotki* [Prospects for the use of peat deposits with especially valuable types of raw materials for obtaining products of complex biothermalchemical processing]. *Tez. dokl. VII mezhdunar. nauch.-tekhn. konferenc. posvyashch. 150-letiyu Periodicheskoy tablicy him. elementov D. I. Mendeleeva*, Minsk, 28–30 maya 2019 g. "Al'ternativnye istochniki syr'ya i topliva" [Proc. VII Int. sci. and tech. conf. dedicated 150th anniversary of the Periodic Table of Chem. elements D. I. Mendeleev "Alternative sources of raw materials and fuel"]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019, pp. 70–71. (in Russian)
5. Kurzo B. V., Krakoveckij A. V. *Rajonirovanie territorii Belarusi po prigodnosti zapasov torfa i zalegayushchego sovmestno s nim sapropelya dlya vypuska produkciyi kompleksnogo naznacheniya* [Zoning of the territory of Belarus according to the suitability of peat reserves and sapropel occurring together with it for the production of complex-purpose products]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2018, no. 1, pp. 176–189. (in Russian)
6. Makarenko T. I. *Racional'noe osvoenie torfyanyh mestorozhdenij Respublikii Belarus'* [Rational development of peat deposits of the Republic of Belarus]. *Materialy po izucheniyu russkih pochv = Materials for the study of Russian soils*, 2017, iss. 9 (36), pp. 211–214. (in Russian)
7. Makaranka T., Kudrevich M. The scheme of distribution of peatlands in the directions of use. Book of Abstracts Symposium International Peatlands Society 50 years. Scientific Sessions, Thursday, September 13, 2018. Netherlands, 2018, p. 71.
8. Lis L. S. *Izmenenie harakteristik torfyanyh mestorozhdenij Respublikii Belarus' v zavisimosti ot geograficheskoy shiroty* [Changes in the characteristics of peat deposits in the Republic of Belarus depending on the geographical latitude]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2020, no. 1, pp. 108–114. (in Russian)
9. Kurzo B. V., Gajdukevich O. M. *Prognoz nalichiya sapropelya pod torfyanoy zalezh'yu* [Prediction of the presence of sapropel under the peat deposit]. *Materialy mezhdunar. nauchn.-prakt. konf., posvyashch. 110-letiyu Instituta melioracii i 110-letiyu so dnya rozhd. akad. S. G. Skoropanova*, Minsk, 5–6 noyab. 2020 g. "Innovacionnye tekhnologii v melioracii: opyt, strategiya, prioritety (Skoropanovskie chteniya)" [Proc. Int. sci.-pract. conf., dedicated to the 110th anniversary of the Institute of Reclamation and the 110th anniversary of Academician S. G. Skoropanov "Innovative Technologies in Land Reclamation: Experience, Strategy, Priorities (Skoropanovskie Readings)"]. Minsk, 2021, pp. 261–265. (in Russian)
10. Gajdukevich O. M., Kurzo B. V., Vorona M. V., Klyauzze I. V. *Ocenka sostava sapropelya ozerno-bolotnogo kompleksa "Koldychevskoe-Korytino" dlya vybora napravlenij ego ispol'zovaniya* [Estimation of the composition

- of sapropel of the lake-marsh complex "Koldychevskoe-Korytino" for the selection of directions for its use]. *Sb. materialov V mezhdunar. nauchno-praktich. konf., Brest, 27–29 sent. 2021 g., v 2 ch. "Aktual'nye problemy nauk o Zemle: ispol'zovanie prirodnnyh resursov i sohranenie okruzhayushchey sredy"* [Proc. V Int. sci. and pract. conf. "Current Issues in Geosciences: Use of Natural Resources and Preservation of the Environment"]. Brest, BrSU, 2021, part 2, pp. 87–90. (in Russian)
11. Kurzo B. V., Tatkov A. Yu., Gajdukevich O. M. *Osobennosti formirovaniya i ispol'zovaniya resursov sapropelya v zapadnoj i vostochnoj chastyah Belorusskogo Poles'a* [Features of the formation and use of sapropel resources in the western and eastern parts of the Belarusian Polissya]. *Zb. navuk. prac X Mizhnar. navuk. kanf. "Pryrodnae asyayrodze Palessya i navukova-praktychnyya aspeky racyyanal'naga resursakarystannya", Brest, 14–16 veras., 2022 g. "Pryrodnae asyayrodze Palessya: asablivasci i perspektivnyy razvivycya"* [Proc. 10th Int. sci. conf. "Natural environment of Polesie and scientific and practical aspects of rational environmental management" "The natural environment of Polesie: features and development prospects"]. Brest, Alternativa Publ., 2022 iss. 14, pp. 48–54. (in Russian)
  12. Kuncevich V. B., Makarenko T. I., Kurzo B. V., Agejchik I. V., Kalilec L. P. *Obosnovanie vybora syr'evoj bazy organicheskogo sapropelya dlya razrabotki* [Substantiation of the choice of the raw material base of organic sapropel for development]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 146–156. (in Russian)
  13. Kurzo B. V., Gajdukevich O. M. *Uchet tekhnologicheskikh i ekologicheskikh faktorov pri razrabotke mestorozhdenij sapropelya* [Accounting for technological and environmental factors in the development of sapropel deposits]. *Materialy 4-j Mezhdunar. nauch. shkoly akad. K. N. Trubeckogo "Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sohraneniya zemnyh nedr"* [Proc. 4 Int. sci. school of academician K. N. Trubetskoy "Problems and prospects of the integrated development and conservation of the earth's interior"]. Moscow, 2020, pp. 299–303. (in Russian)
  14. Arens V. Zh., Babichev N. I., Bashkatov A. D., Gridin O. M., Hrulev A. S., Hcheyan G. H. *Skvazhinnaya gidrodobycha poleznyh iskopaemyh* [Borehole hydraulic mining]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2007, 291 p. (in Russian)
  15. Bogatov B. A., Voitenko V. S., Kireev A. M. *Perspektivny skvazhinnoj dobychi poleznyh iskopaemyh v Belarusi* [Prospects for borehole mining in Belarus]. Minsk, Technoprint Publ., 2004, 257 p. (in Russian)
  16. Kosov V. I., Zolotuhin A. P. *Ot geoekologii do nanotekhnologii. Kompozitnye stroitel'nye i toplivno-energeticheskie materialy iz organogennyh gornyh porod i othodov* [From geoecology to nanotechnology. Composite building and fuel-energy materials from organogenic rocks and waste]. St. Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University, 2010, 368 p. (in Russian)
  17. Shtin S. M. *Gidromekhanizirovannaya tekhnologiya razrabotki torfo-saprophelevyh mestorozhdenij s polucheniem organo-mineral'nyh udobrenij i biotopliva* [Hydromechanized technology for the development of peat-sapropel deposits with the production of organo-mineral fertilizers and biofuels]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2009, pp. 63–68. (in Russian)
  18. Dement'ev V. A. *Ekspluataciya obvodnennyh mestorozhdenij* [Exploitation of flooded fields]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2010, 204 p. (in Russian)
  19. Volosuhin V. A., Kravchenko A. S. *Preimushchestva geotekstil'nyh kontejnerov pered sredstvami obezvozhivaniya donnyh otlozhenij v ilohranilishchah* [Advantages of geotextile containers over the means of dehydration of bottom sediments in silt storages]. *Evrazijskij Soyuz Uchenyh (ESU) = Eurasian Union of Scientists (ESU)*, 2015, no. 7 (16), pp. 48–51. (in Russian)
  20. Kurzo B. V., Klyauzze I. V., Vorona M. V., Seraya S. M., Gajdukevich O. M. *Ispol'zovanie torfa i sapropelya dlya polucheniya guminovogo regul'yatora rosta rastenij* [The use of peat and sapropel to obtain a humic plant growth regulator]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 136–145. (in Russian)

#### Информация об авторах

*Гайдукевич Олег Михайлович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

*Курзо Борис Валентинович* – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией использования и охраны торфяных и сапропелевых месторождений, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

*Кунцевич Виктор Болеславович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

#### Information about authors

*Oleg M. Gaidukevich* – Ph. D. (Technical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

*Boris V. Kurzo* – D. Cs. (Technical), Associate Professor, Head of Lab. of peat and sapropel deposits utilization and protection, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

*Victor B. Kuntsevich* – Ph. D. (Technical), Senior researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

*Кляуззе Ирина Валентиновна* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

*Макаренко Татьяна Ивановна* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: makarenko.IP@mail.ru

*Ворона Мария Васильевна* – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

*Татков Антон Юрьевич* – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

*Сорокин Александр Иванович* – кандидат технических наук, заместитель директора по общим вопросам, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

*Агейчик Инна Валерьевна* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: ageichik.iv@mail.ru

*Irina V. Klyauzze* – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

*Tatiana I. Makarenko* – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: makarenko.IP@mail.ru

*Maria V. Vorona* – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

*Anton Yu. Tatkov* – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

*Aleksandr I. Sorokin* – Ph. D. (Technical), Deputy Director of the Institute, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

*Inna V. Ageichik* – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: ageichik.iv@mail.ru

## ЗНАЧИМЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНСТИТУТА ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НАН БЕЛАРУСИ В ОБЛАСТИ ГЕОТЕКТОНИКИ, ГЕОФИЗИКИ И НЕФТЯНОЙ ГЕОЛОГИИ

Я. Г. Грибик, Р. Г. Гарецкий, Р. Э. Гирин

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Приведен краткий анализ значимых геологических результатов последнего периода, полученных в Институте природопользования НАН Беларуси, представленных в виде двух блоков, включающих проекты фундаментального и прикладного значения. Фундаментальные разработки этого периода включают исследования по разломной тектонике Беларуси, синрифтовой геодинамике Припятского прогиба, эколого-тектонофизической среде Беларуси, шовные зоны на территории Беларуси, геолого-геофизическая модель глубинного строения земной коры по профилю Георифт-2013, нетрадиционные источники углеводородного сырья Беларуси. В числе разработок прикладного характера – это создание модели нефтегеологического районирования Припятского прогиба, обоснование исследований по геолого-геофизическому профилю «Восточный», особенности проявления природной ртути в геологической среде, обоснование работ на нефть на Познякевичской площади и системные исследования приоритетных участков Припятского прогиба, геолого-геофизические исследования на Вечернегорской площади Антарктиды.

**Ключевые слова:** геофизическое; геологическое изучение; полезные ископаемые; перспективные объекты; рекомендации по изучению; освоение недр.

**Для цитирования.** Грибик Я. Г., Гарецкий Р. Г., Гирин Р. Э. Значимые научные и прикладные результаты Института природопользования НАН Беларуси в области геотектоники, геофизики и нефтяной геологии // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 53–67.

## SIGNIFICANT SCIENTIFIC AND APPLIED RESULTS OF THE INSTITUTE OF NATURE MANAGEMENT OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS IN THE FIELD OF GEOTECTONICS, GEOPHYSICS AND PETROLEUM GEOLOGY

Ya. G. Gribik, R. G. Garetsky, R. E. Girin

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** A brief analysis of the significant geological results of the last period obtained at the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, presented in the form of two blocks, including projects of fundamental and applied importance, is given. The fundamental developments of this period include studies on the fault tectonics of Belarus, synrift geodynamics of the Pripyat trough, the ecological and tectonophysical environment of Belarus, suture zones on the territory of Belarus, a geological and geophysical model of the deep structure of the Earth's crust according to the Georift-2013 profile, unconventional sources of hydrocarbon raw materials of Belarus. Among the developments of an applied nature are the creation of a model of the oil and geological zoning of the Pripyat trough, the justification of studies on the geological and geophysical profile "Vostochny", the features of the manifestation of natural mercury in the geological environment, the justification of oil work on Poznyakevichskaya Square and systematic studies of priority areas of the Pripyat trough, geological and geophysical studies on the Vechernegorskaya area of Antarctica.

**Keywords:** geophysical; geological study; minerals; promising objects; recommendations for the study; development of the subsoil.

**For citation.** Gribik Ya. G., Garetsky R. G., Girin R. E. Significant scientific and applied results of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus in the field of geotectonics, geophysics and petroleum geology. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 53–67.

**Введение.** В настоящей статье приведена информация о геологических результатах, полученных с периода передачи научных геологических исследований в структуру Института природопользования НАН Беларуси в 2008 г. Основной научной организацией в стране, где проводились фундаментальные геологические исследования, был Институт геохимии и геофизики НАН Беларуси. В предшествующий период в нем были представлены важнейшие фундаментальные направления геологии, включающие основную геологическую научную триаду – стратиграфию, литологию и тектонику, без развития которых невозможны прикладные геологические исследования по изучению недр Беларуси и поиски залежей полезных ископаемых.

В истории белорусской геологии научные исследования определялись и формировались в рамках ведущих научных институтов, одним из которых являлся Институт геохимии и геофизики НАН Беларуси, где в 1970–80-е гг. сформировались следующие научные школы в области геологии:

- литологии под руководством академика А. С. Махнacha;
- геохимии под руководством академика К. И. Лукашева;
- четвертичной геологии, геоморфологии и палеогеографии под руководством академика Г. И. Горецкого;
- гидрогеологии под руководством академика Г. В. Богомолова;
- геотектоники, геодинамики и геофизики под руководством академика Р. Г. Горецкого и профессора Г. И. Карапаева.

Следующий этап в развитии данных геологических школ начался в 2008 г., когда группа геологов, геофизиков и геохимиков была переведена в Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси (теперь – Институт природопользования НАН Беларуси).

С этого времени основными направлениями деятельности геологических школ Института природопользования НАН Беларуси являются:

- геотектоника и геодинамика, неотектоника, геофизика (академик Р. Г. Горецкий, академик А. К. Карабанов, член-корреспондент Р. Е. Айзберг, профессор Г. И. Карапаев);
- четвертичная геология, геоморфология и палеогеография (академик А. В. Матвеев);
- гидрогеология и гидроэкология (член-корреспондент А. В. Кудельский, доктор геолого-минералогических наук В. Г. Жогло).

Проводимые в рамках данных школ исследования направлены, прежде всего, на развитие наук о Земле, позволяющих решать как фундаментальные, так и прикладные геологические задачи по расширению минерагенических исследований и обеспечения экологически безопасного устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь.

Среди важнейших результатов научных исследований и разработок, полученных в рамках геологических школ за последний период (2008–2022 гг.), следует отметить разработки как фундаментального, так и прикладного направления. Среди разработанных фундаментальных исследований этого периода необходимо выделить следующие: разломы земной коры Беларуси, синрифтовую геодинамику Припятского прогиба, эколого-тектонофизическую среду Беларуси, шовные зоны Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии, геолого-геофизическую модель глубинного строения земной коры по международному профилю Георифт-2013, нетрадиционные источники углеводородного сырья Беларуси. Характеристика полученных результатов приведена ниже. Параллельно с фундаментальными разработками выполнены исследования прикладного направления, среди которых весомое место занимает создание карт нефтегеологического районирования Припятского прогиба, проектирование изучения геолого-геофизического строения по профилю Восточный, проявления ртути на территории Беларуси, обоснование работ на Позняковской площади, системные исследования приоритетных объектов Припятского прогиба, геолого-геофизические исследования на Вечернегорской площади Антарктической платформы.

**Фундаментальные исследования.** Результаты многолетних исследований разломов земной коры территории Беларуси и сопредельных регионов Восточно-Европейской платформы изложены в монографии «Разломы земной коры Беларусь» [1].

Изучение разломов земной коры Беларуси, которая включает ее консолидированную часть и платформенный чехол, имеет определяющее значение в решении проблем тектоники, магматизма, минерагении и иных направлений геологических наук. По результатам исследования по комплексу геолого-геофизических данных выделены и типизированы разломы консолидированной коры и платформенного чехла территории Беларуси (рис. 1).

Проанализированы геофизические и геологические характеристики глубинных разломов консолидированной коры Беларуси, показаны особенности петрологии, металлогении и рудоносности приразломных зон. Отражены различные аспекты изучения разновозрастных и разнотипных разломов платформенного чехла, развивавшихся на протяжении основных этапов его формирования в позднем протерозое и фанерозое в условиях различных геодинамических обстановок. Показана связь с разломной тектоникой разноранговых структур чехла и ее роль в проявлении платформенного магматизма, генезисе нефтегеопрективных объектов, размещении зон возможного возникновения землетрясений.

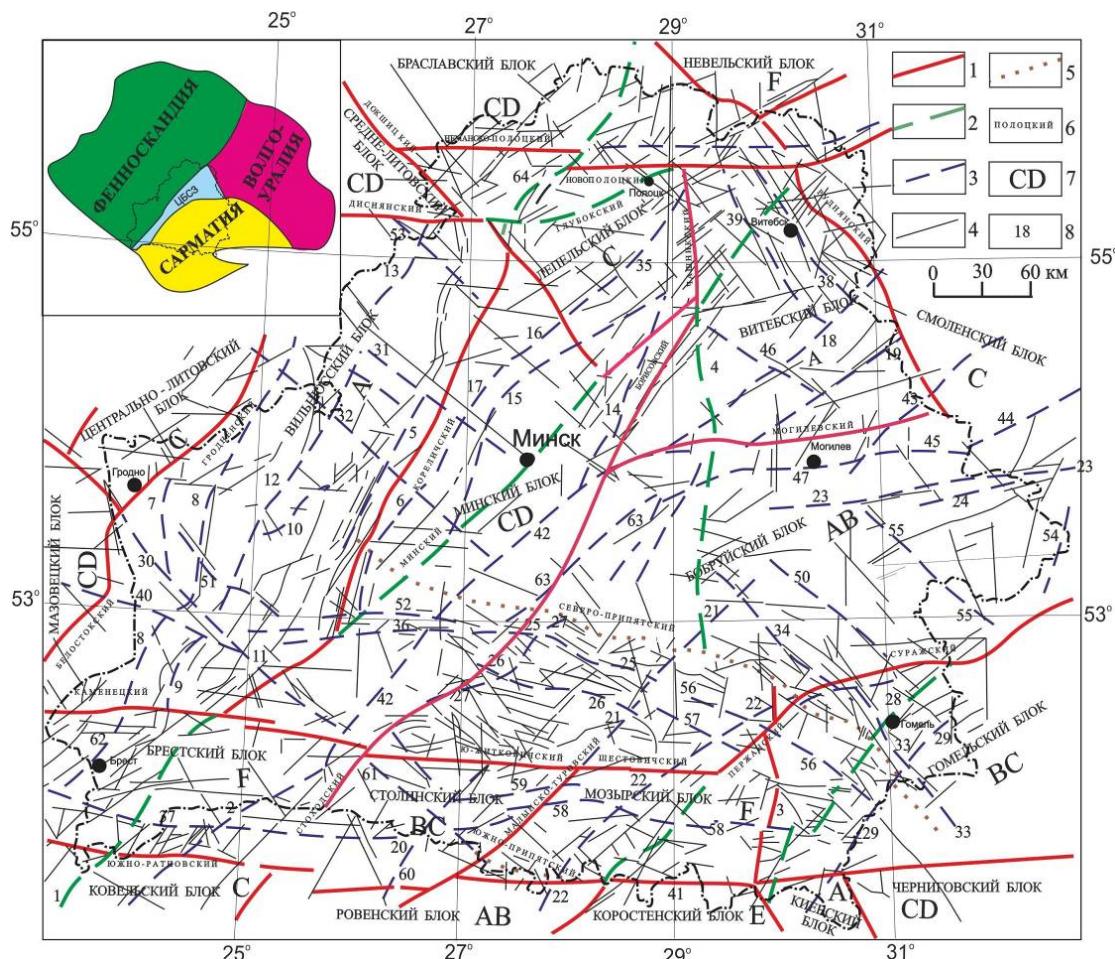


Рис. 1. Схема разломов консолидированной коры Беларуси [1]

Fig. 1. Breakdown of the consolidated crust of Belarus

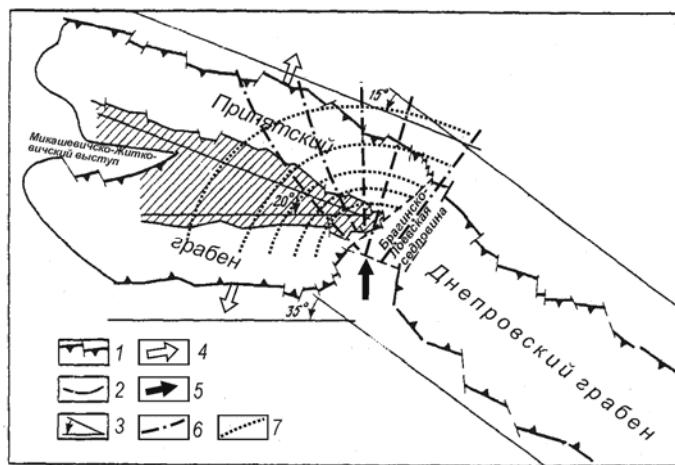
Эти исследования являются первым обобщением, в котором системно изложены результаты изучения разломов земной коры Беларуси и сопредельных регионов Восточно-Европейской платформы. Монография служит научным ориентиром в практике геологоразведочных и инженерно-геологических работ.

Результаты многолетних исследований проблем синрифтовой геодинамики Припятского прогиба – тектонотипа палеорифтового бассейна Восточно-Европейской платформы, отражены в монографии «Синрифтовая геодинамика Припятского прогиба» [2]. В книге изложены тектоническая и формационная основы палеогеодинамических реконструкций Припятской зоны рифтогенеза. Показаны результаты синрифтовых геодинамических условий, особенности пространственного распределения палеонапряжений. Охарактеризовано влияние внутри- и внебассейновых геодинамических факторов на процесс рифтогенеза. Рассмотрены аспекты нефтегазоносности Припятского прогиба в свете геотермических и геодинамических реконструкций и палеотектонического анализа. Предложены обобщенная многофакторная модель рифтогенеза и представления авторов по дискуссионным проблемам синрифтовой геодинамики Припятского региона.

Ключевым вопросом настоящей разработки является исследование роли Брагинско-Лоевской седловины в палеорифтовом формировании Днепровско-Донецко-Припятского авлакогена. На базе выполненных исследований обоснована левосторонняя природа Лоевского разлома в пределах Брагинско-Лоевской седловины. Именно на этом участке создавалось поле максимального поперечного сжатия с поперечным распределением напряжения на пограничных участках (рис. 2).

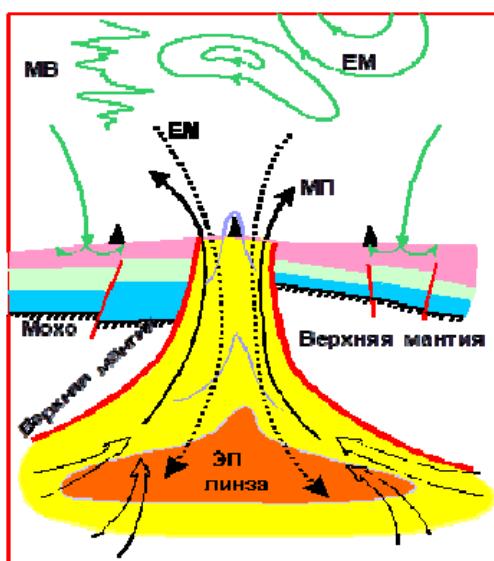
На территории Беларуси развита сеть геодинамических полигонов, на которых [3] в течение многолетних наблюдений получены данные о вариациях во времени гравитационного и магнитного полей, обусловленные протеканием современных тектонофизических и космических процессов, особенно ярко проявляющихся в зонах разломов литосферы. Установлено негативное влияние этих процессов на жизнедеятельность человека. Разработана специальная геолого-математическая модель эколого-

тектонофизической среды Беларуси, способная по геолого-геофизическим материалам производить оценку экологического состояния за изучаемый период и сформулировать мероприятия по предотвращению возможных отрицательных влияний тектонофизического и космического факторов на состояние здоровья человека и объектов его жизнедеятельности (рис. 3).



**Рис. 2. Интерпретация тектонической обстановки в Припятском палеорифте с позиций поступательно-вращательного движения блока Внутреннего грабена:**  
**1 – краевые разломы Припятско-Донецкого авлакогена; 2 – западная граница Припятского палеорифта;**  
**3 – угол и направление предполагаемого поворота Северо-Припятского и Южно-Припятского**  
**краевых разломов по отношению к таковым Днепровско-Донецкого авлакогена; 4 – вектор главных**  
**растягивающих напряжений палеорифта; схема динамического влияния Брагинского штампа;**  
**5 – вектор активного усилия; траектории осей: 6 – сжатия, 7 – растяжения**

**Fig. 2. Interpretation of the tectonic situation in the Pripyat paleorift**  
**from the perspective of the translational-rotational movement of the Inner graben block:**  
**1 – marginal faults of the Pripyat-Donets avlakogen; 2 – the western border of the Pripyat paleorift;**  
**3 – the angle and direction of the expected rotation of the North-Pripyat and South-Pripyat marginal faults**  
**in relation to those of the Dnieper-Donetsk avlakogen; 4 – the vector of the main tensile stresses of the paleorift;**  
**the scheme of the dynamic influence of the Bragin stamp: 5 – the vector of active effort;**  
**the trajectories of the axes: 6 – compression, 7 – stretching**

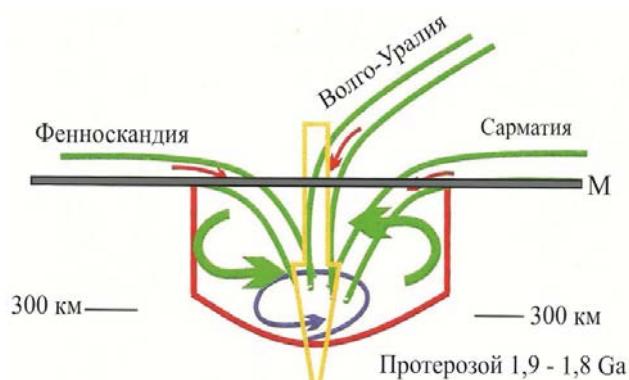


**Рис. 3. Схема движения электромагнитного поля в разломе:**  
**EM – электромагнитное поле; МП – магнитное поле; MB – вариации поля; ЕП – электропроводящая линза**

**Fig. 3. Diagram of the movement of the electromagnetic field in the fault:**  
**EM – electromagnetic field; MP – magnetic field; MB – field variations; EP – electrically conductive lens**

Работа является важнейшим научным анализом взаимосвязи геофизических полей с геологическим строением региона и их воздействием на окружающую среду и жизнедеятельность человека [3].

На основании комплексной геологической интерпретации геофизических полей [4] с применением методики физико-геологического моделирования разреза изучены глубинное строение и вещественные неоднородности литосферы и астеносферы линейных межсегментных коллизионных зон (Центральнобелорусской, Рязано-Саратовской и Центральнорусской конвергенции Фенноскандинавского, Сарматского и Волго-Уральского сегментов, образующих Восточно-Европейский кратон, и выделен новый тектонический элемент – Слободской тектоногеодинамический узел их тройственного сочленения, в котором веерообразно сходятся магнитные и гравитационные аномалии, ранние авлакогены и Осницко-Микашевичский и Серпуховский вулкано-плутонические пояса. Установлены существенные различия тектонофизической природы образования этих структур: линейные шовные зоны, сопровождаемые вулкано-плутоническими поясами, формировались в процессе субдукции андского и зондского типов с последующей коллизией, а природа Слободского узла связывается с тектонофизическими процессами взаимодействия сжимающих напряжений, возбуждаемых глубокофокусными землетрясениями с пересекающими их конвективными потоками мантийного вещества (рис. 4), затягиванием вещества земной коры сегментов в верхнюю мантию. Широкий спектр осадочно-вулканогенных и интрузивных формаций, присущих зонам сочленения сегментов земной коры, обуславливает их высокий металлогенический потенциал. Кроме того, в процессе субдукции в результате перемещения горных пород на глубинные уровни переплавления докембрийских водонасыщенных карбонатно-силикатных осадков могут возникать алмазоносные магмы. В качестве примера в монографии приведены перспективы рудоносности Центральнобелорусской шовной зоны и влияния ее субдукционного процесса на перспективы алмазоносности Беларуси.



**Рис. 4. Тектонофизическая модель вихревого (омутообразного) механизма формирования Слободского узла в протерозое**

**Fig. 4. Tectonophysical model of the vortex (pool-like) mechanism of formation of the Sloboda node in the Proterozoic**

В рамках международного сотрудничества на основе проведенного профиля глубинного сейсмического зондирования Георифт-2013 создана геолого-геофизическая модель глубинного строения земной коры и верхней мантии Припятского и Днепровского палеорифтовых нефтегазоносных бассейнов, определяющая направление минерагенических исследований и геологоразведочных работ (рис. 5).

Впервые установлена продольная геолого-геофизическая структура земной коры и верхней мантии Припятского и Днепровского бассейнов, наиболее глубоких структур рифтового типа в Европе.

Новые данные позволяют реконструировать палеогеодинамические условия формирования этих палеорифтовых структур, контролирующих размещение месторождений углеводородного сырья, калийных и каменных солей, углей и сланцев, промышленных рассолов и др.

Проведенные исследования позволяют обосновать в восточном регионе Беларуси перспективы поисков полезных ископаемых, генезис которых связан с нижними слоями литосферы и подлитосферной верхней мантией.

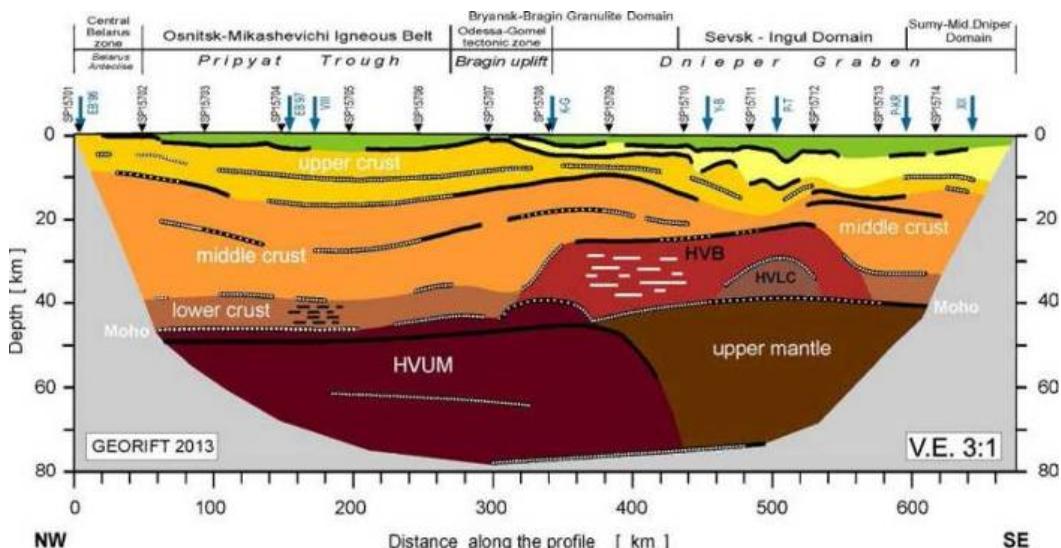
Геолого-геофизические и палеогеодинамические исследования в пределах изученных бассейнов дали основания вместе с коллегами из Украины, Польши, Финляндии и Дании [5]:

- выявить сейсмоскоростной разрез до глубины 80–90 км;

- установить значительные различия в структуре земной коры, верхней мантии и коромантийной границы под Припятским и Днепровским бассейнами;

- открыть новую региональную нижнекоровую структуру протяженностью 230 км (от Брагинско-Лоевской зоны до района г. Полтава) и мощностью 18 км – Западно-Днепровскую «рифтową подушку» (rift pillow);

– определить глубинные субвертикальные границы раздела между Припятским и Днепровским сегментами, отраженные в строении поверхностей Мохо, субМохо, гравитационных и магнитных аномалий, уровнем и характером залегания основных слоев земной коры. Указанные данные позволяют существенно развить теоретические представления о рифтогенезе и представляют собой геолого-геофизическую базу для нового направления минерагенических исследований в палеорифтах древних платформ, в том числе восточном регионе Беларуси.



**Рис. 5. Упрощенная структура литосферы вдоль профиля глубинного сейсмического зондирования Георифт-2013**

**Fig. 5. Simplified structure of the lithosphere along the profile of deep seismic sounding Georift-2013**

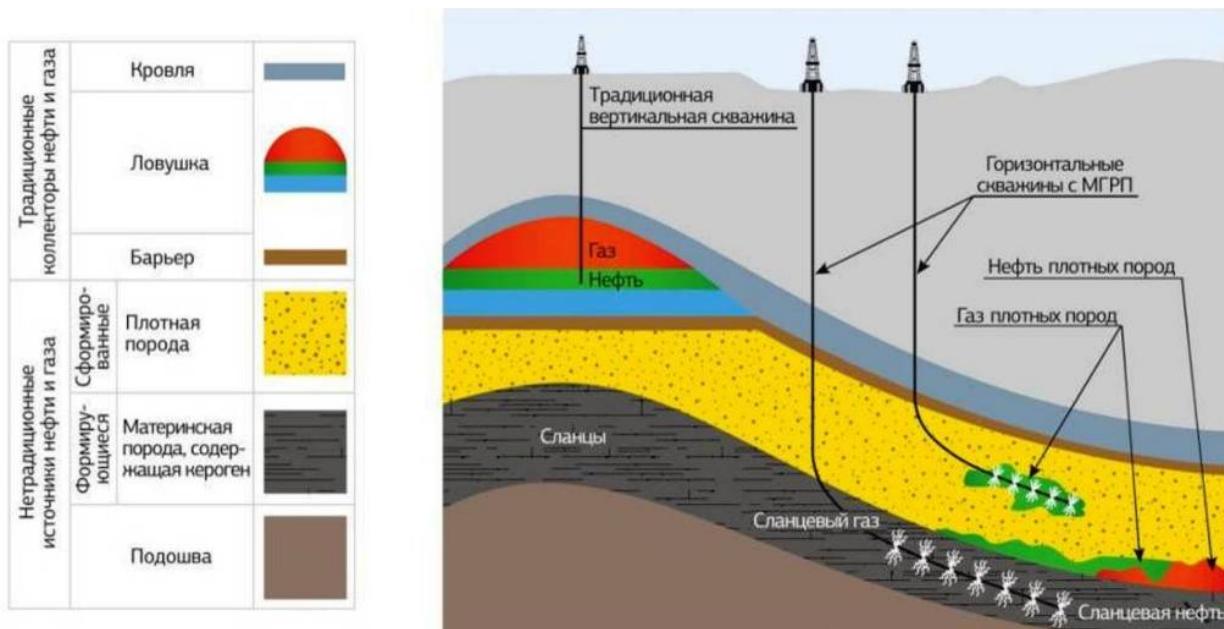
За осуществление данной работы коллектив авторов, представленный такими учеными, как Р. Е. Айзберг, Р. Г. Гарецкий, Я. Г. Грибик, Г. И. Каратаев, получил диплом конкурса «Топ-10 результатов деятельности ученых Национальной академии наук Беларусь за 2018 год в области фундаментальных и прикладных исследований».

В монографии Р. Е. Айзberга с соавторами «Нетрадиционные источники углеводородного сырья в недрах Беларусь: геологические аспекты» (под редакцией Р. Е. Айзberга, Я. Г. Грибика) [6] изложена авторская концепция изучения нетрадиционных источников углеводородов в недрах Беларусь с анализом основных структурно-вещественных и генетических характеристик нетрадиционных источников углеводородов. В исследовании детально отражены геолого-геофизические критерии возможных условий размещения нетрадиционных источников углеводородов в Припятском нефтегазоном бассейне. Приведена оригинальная прогнозная картографическая модель размещения традиционных, нетрадиционных и комбинированных залежей углеводородов в межсолевом комплексе Припятского прогиба (рис. 6).

В книгу включены развернутые характеристики геолого-геофизических и геохимических критериев возможного размещения нетрадиционных источников углеводородов в Оршанской и Подляско-Брестской впадинах соответственно. Изложено обоснование приоритетных направлений геологоразведочных работ на нетрадиционные источники углеводородного сырья в Беларусь.

Представлена оценка потенциала нетрадиционных источников углеводородного сырья в недрах Беларусь, прогноз их поисковых объектов, обоснование направления геологоразведочных работ на перспективу путем анализа геологических, геофизических и геохимических данных в Припятском, Оршанском и Подляско-Брестском бассейнах на основе изучения структурно-вещественных характеристик низкопроницаемых формаций с рассеянной (дискретной) битуминозностью или нефтенасыщенностью, а также структур с тяжелыми нефтями. Приводятся научные выводы относительно широкого развития в девонских отложениях Припятского прогиба низкопроницаемых нефтеперспективных полуколлекторов.

Результаты анализа имеют важное прикладное значение для расширения стратиграфического диапазона нефтеносности Припятского прогиба, что подтвердились геологоразведочными работами на Речицком месторождении. В июле 2022 г. в скважине Речицкая 385 получен промышленный приток нефти из пород кристаллического фундамента.



**Рис. 6. Модели залежи углеводородов по способу залегания: МГРП – многостадийный гидроразрыв пласта**

**Fig. 6. Model of deposit of hydrocarbons by the method of occurrence: МГРП – multistage hydraulic fracturing**

**Прикладные исследования.** Выполнена обобщающая работа по оценке состояния и определению направлений поисково-разведочных работ на нефть в Припятском прогибе. Исполнителями совместной работы являлись специалисты РУП «Белгеология», РУП «ПО «Белоруснефть» и Института природопользования НАН Беларуси. По результатам исследований составлены геолого-геофизические материалы по обоснованию направления геологоразведочных работ на перспективу.

На базе громадного объема геолого-геофизических данных и на основе оригинальных классификаций и кодификаций структурных форм разного порядка построена карта структурного районирования нефтеперспективных комплексов, представляющая собой тектоническую модель неоднородности недр, которая служит важнейшей основой для разработки моделей генерации, аккумуляции и сохранения залежей углеводородов.

Созданные структурные модели основных нефтеносных комплексов Припятского прогиба включают:

- Карту структурного районирования подсолевого комплекса для решения задач эффективного освоения ресурсов углеводорода. Масштаб 1 : 200 000 (авторы: Р. Е. Айзберг, В. Н. Бескопыльный, Я. Г. Грибик) [7] (рис. 7);

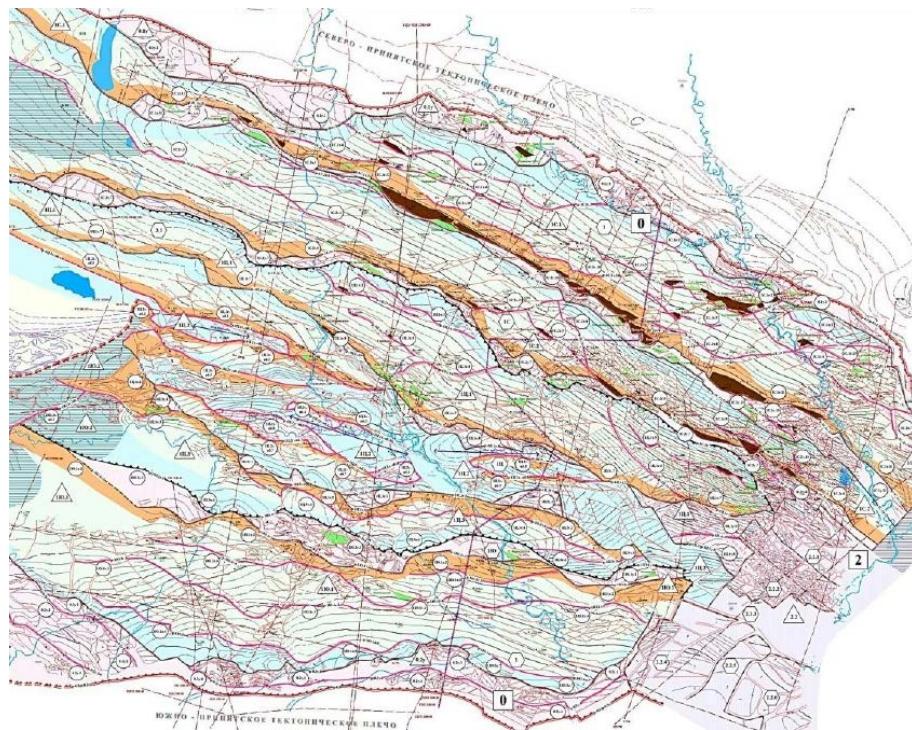
- Карту структурного районирования межсолевого комплекса для решения задач эффективного освоения ресурсов углеводорода. Масштаб 1 : 200 000 (авторы: Р. Е. Айзберг, В. Н. Бескопыльный, Я. Г. Грибик) [8].

Кроме того, составлены обобщающие тектонические карты по кристаллическому фундаменту, верхнесоленоносной толще, которые с картами районирования служат основой для планирования региональных и детальных сейсморазведочных и буровых работ.

Разработанные карты являются основой для прогнозирования и планирования геологоразведочных работ регионального и детального направления на текущую и дальнеспечную перспективу.

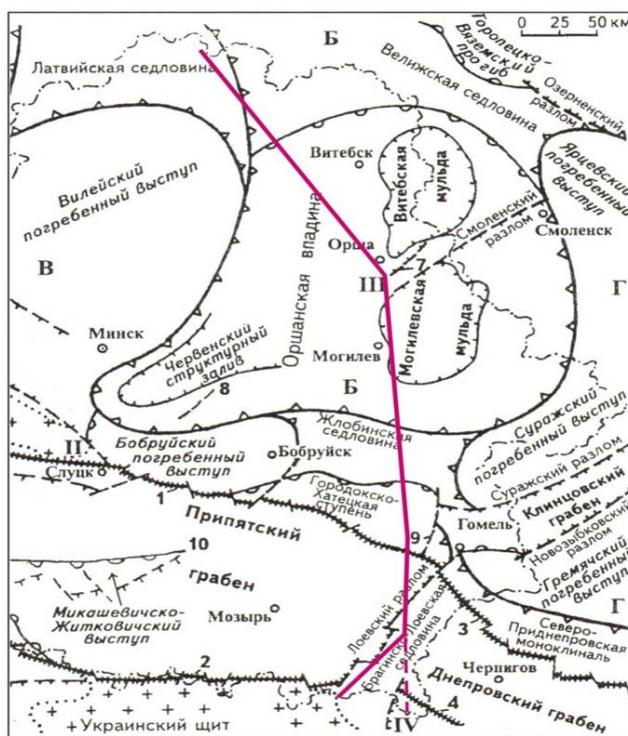
Эти карты являются основой прогнозирования перспективных объектов и всех картографических моделей нефтегеологического содержания. Ведущими элементами структурного районирования, контролирующими зоны нефтеобразования и нефтенакопления, являются структурные гребни, уступы, террасы и подножия тектонических ступеней. Установлены основные закономерности размещения месторождений углеводородов относительно указанных элементов.

Обоснованы исследования геологического строения Беларуси по региональному профилю «Восточный», пересекающему восточную часть Беларуси от границы с Украиной на юге до границы с Российской Федерацией в Псковской области. Профиль проходит от Украинского щита через Брагинский выступ, Лоевскую седловину, восточную часть Припятского прогиба, Жлобинскую седловину, Оршансскую впадину до Латвийской седловины – общей протяженностью 540 км [9]. Профиль включает южную, центральную и северную части. В пределах каждой части использованы пробуренные параметрические скважины и проектные (рис. 8). В качестве проектной рекомендована скважина Оршанская 101 в районе пересечения проектного профиля с сейсмическим профилем V–V. Бурение скважины планируется в 2023 г.



**Рис. 7. Карта структурного районирования подсолевого комплекса Припятского прогиба**

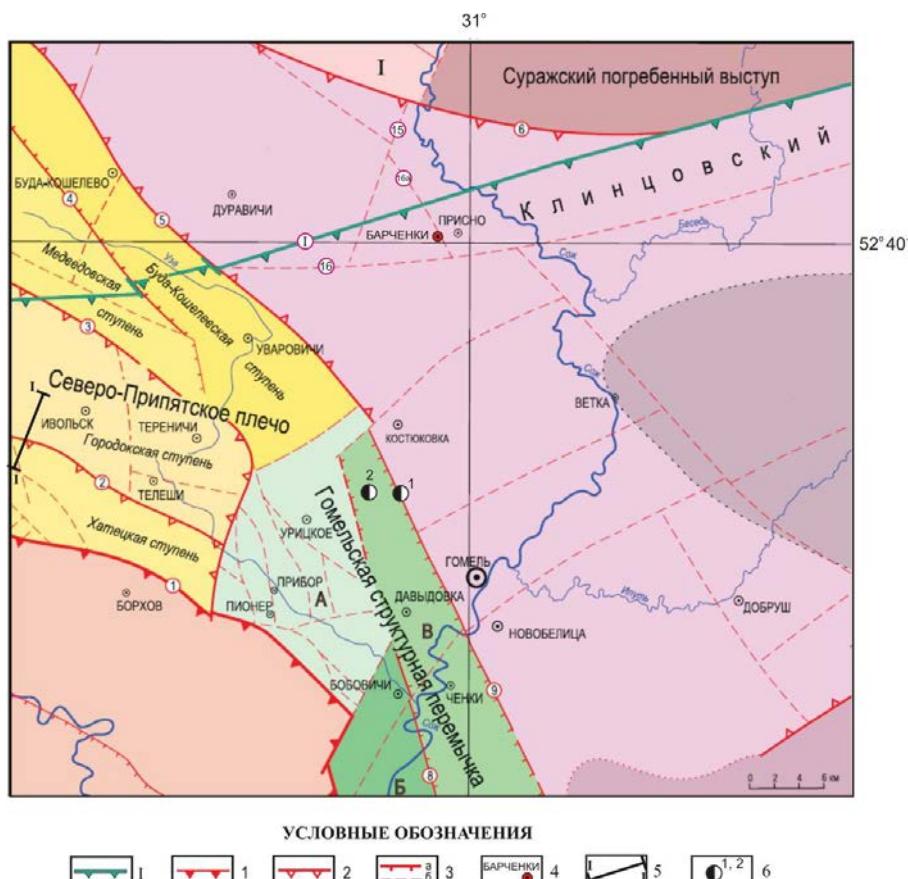
**Fig. 7. Map of the structural zoning of the subsalt complex of the Pripyat trough**



**Рис. 8. Карта тектонического районирования территории Беларуси по поверхности фундамента.**  
Составители – Р. Г. Гарецкий, Р. Е. Айзберг

**Fig. 8. Map of the tectonic zoning of the territory of Belarus on the surface of the foundation.**  
Compiled by R. G. Garetsky, R. E. Aizberg

По результатам обобщения и анализа геолого-geoхимических данных [10] приводится описание первого в Беларусь проявления ртути в д. Барченки, расположенной в 25 км к северу от г. Гомеля. Ртуть проявила в помещении сельского дома и на подворье в виде металлических шариковых скоплений. Эпизодическими обследованиями установлено более широкое распространение ртути и в других деревенских домах. По результатам ртутометрических исследований по рекогносцировочному профилю вдоль деревни установлено несколько участков с повышенной концентрацией паров ртути в подпочвенном воздухе. Сравнительным анализом распределения ртути в подпочвенном воздухе над Городокским региональным разломом и трубкой взрыва Цупер, расположенных в пределах Североприпятского плеча, проявление ртути в д. Барченки обосновывается как природное и оно обусловлено расположением деревни в районе тектонического нарушения или участка с погребенной трубкой взрыва (рис. 9).



**Рис. 9. Карта распределения объектов с аномалиями ртути в районе Гомельской структурной перемычки и Североприпятского плеча (составители – Я. Г. Грибик, А. В. Беляшов) на основе карты тектонического районирования юго-восточной части Беларуси по поверхности фундамента (по Р. Г. Гарецкому, В. И. Толстощееву, С. А. Крученку и др.):**  
**I, 1–3 – разломы (I – глубинный суперрегиональный Пержанско-Сурожский, 1 – Североприпятский суперрегиональный, 2 – региональные, 3 – субрегиональный (а) и локальный (б));**  
**разломы и их номера: 2 – Городокский, 15 – Чечерский, 15а – Барченковский, 16 – Южно-Присновский;**  
**4 – ртутное проявление д. Барченки; 5 – геохимический профиль над Городокским разломом;**  
**6 – перспективный геофизический участок (ПГУ-1) с геохимической аномалией по ртути**  
**(1 – № 71; 2 – № 68, 69)**

**Fig. 9. Map of the distribution of objects with mercury anomalies in the area of the Gomel structural bridge and the Severopripyat shoulder (compiled by Ya. G. Gribik, A. V. Belyashov) based on the map of tectonic zoning of the southeastern part of Belarus on the foundation surface (according to R. G. Garetsky, V. I. Tolstosheev, S. A. Kruchek, etc.):**  
**I, 1–3 – faults (I – deep super-regional Perzhansko-Surazhsky, 1 – Severopripyatsky super-regional, 2 – regional, 3 – sub-regional (a) and local (b)); faults and their numbers: 2 – Gorodoksky, 15 – Chechersky, 15a – Barchenkovsky, 16 – Yuzhno-Prisnovsky; 4 – mercury manifestation of Barchenki;**  
**5 – geochemical profile over the Gorodok fault; 6 – a promising geophysical site (PGS-1) with a geochemical anomaly in mercury (1 – no. 71; 2 – no. 68, 69)**

Важное значение имеет переоценка запасов нефти на первом нефтепроявлении в Беларусь в 1953 г. в скважине Ельская 2. Получение притока нефти на стадии регионального изучения Припятского прогиба явилось положительным фактором к дальнейшему продолжению поисковых работ на нефть. Выполненные работы по испытанию продуктивного внутрисолевого горизонта в эксплуатационной колонне с последующей пробной эксплуатацией скважины свидетельствуют о промышленной значимости выявленной залежи нефти. Изучение и освоение Ельской залежи нефти длительное время сдерживалось как последующими открытиями крупных основных месторождений нефти в Беларусь, так и качеством нефти по плотности и содержанию серы и сероводорода. В настоящее время, в период освоения нетрадиционного углеводородного сырья, этот объект достоин дальнейшей оценки и освоения [11].

По результатам анализа геолого-геофизических и буровых работ, выполненных на Познякевичской площади, обосновывается залежь нефти в верхнесоленосном горизонте с запасами нефти промышленной категории С<sub>1</sub> с рекомендацией дразведки залежи (рис. 10). Через определенный период времени рекомендация реализовывалась в 2021 г. и геологоразведочные работы были прекращены в феврале 2022 г. в связи с проведением специальной военной операции.

По результатам системных исследований приоритетных геологических объектов в Припятском прогибе обосновано новое направление исследований с целью увеличения углеводородного ресурсного потенциала недр на основе современных геолого-геофизических технологий. Выделены два типа приоритетных объектов, которые представляют собой нефтегазопоисковые и исследовательские полигоны.

Первый тип представлен крупными нефтяными многозалежными месторождениями и сопредельными структурами на высокоперспективных участках и разрезах. Второй тип включает структуры западной части Центральной зоны Припятского прогиба, где установлен достаточно высокий уровень прямых нефтегазопроявлений. В качестве приоритетных определены следующие (поли)блоки [12]:

- Речицкий блок, контуры которого охватывают в основном Речицкое месторождение нефти с примыкающими периферийными участками;

- Березинский полиглобок, в контуры системного исследования которого отнесены Березинское, Северо-Березинское, Ново-Березинское, Восточно-Березинское, Восточно-Доброгощанское месторождения нефти и прилегающие к ним (с юго-запада, севера и южного направления, включая гребневую часть Североприпятского плеча) участки;

- Осташковский полиглобок, контуры системного исследования которого охватывают Осташковичское, Сосновское, Пожихарское, Зуевское, Южно-Сосновское, Чкаловское, Южно-Осташковичское месторождения нефти и примыкающие к ним участки (рис. 11).

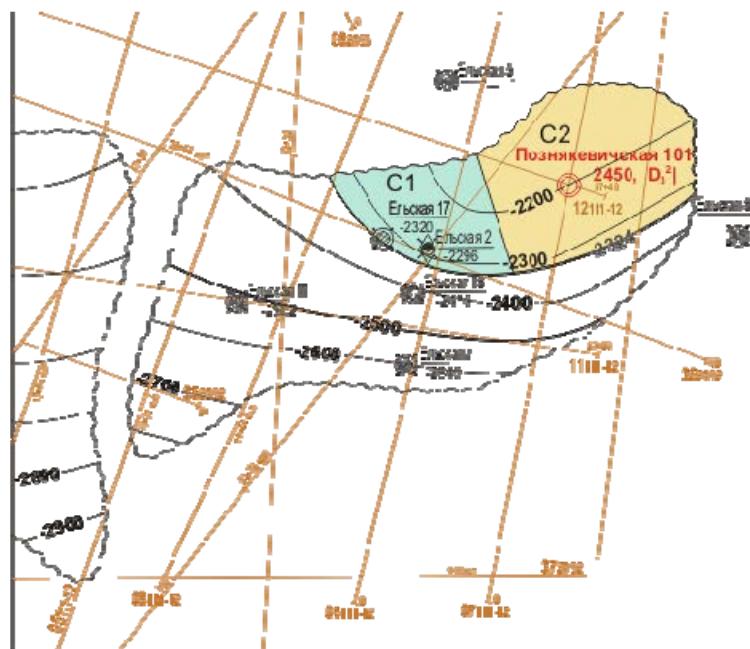


Рис. 10. Познякевичская структура. Структурная карта и подсчетный план по верхнесоленосному продуктивному горизонту. Составитель – Я. Г. Грибик.  
Структурные построения по Л. Г. Москалец, С. В. Полещук

Fig. 10. Poznyakevich structure. Structural map and calculation plan for the upper saltwater productive horizon.  
Compiled by Ya. G. Gribik. Structural constructions by L. G. Moskalets, S. V. Poleshchuk

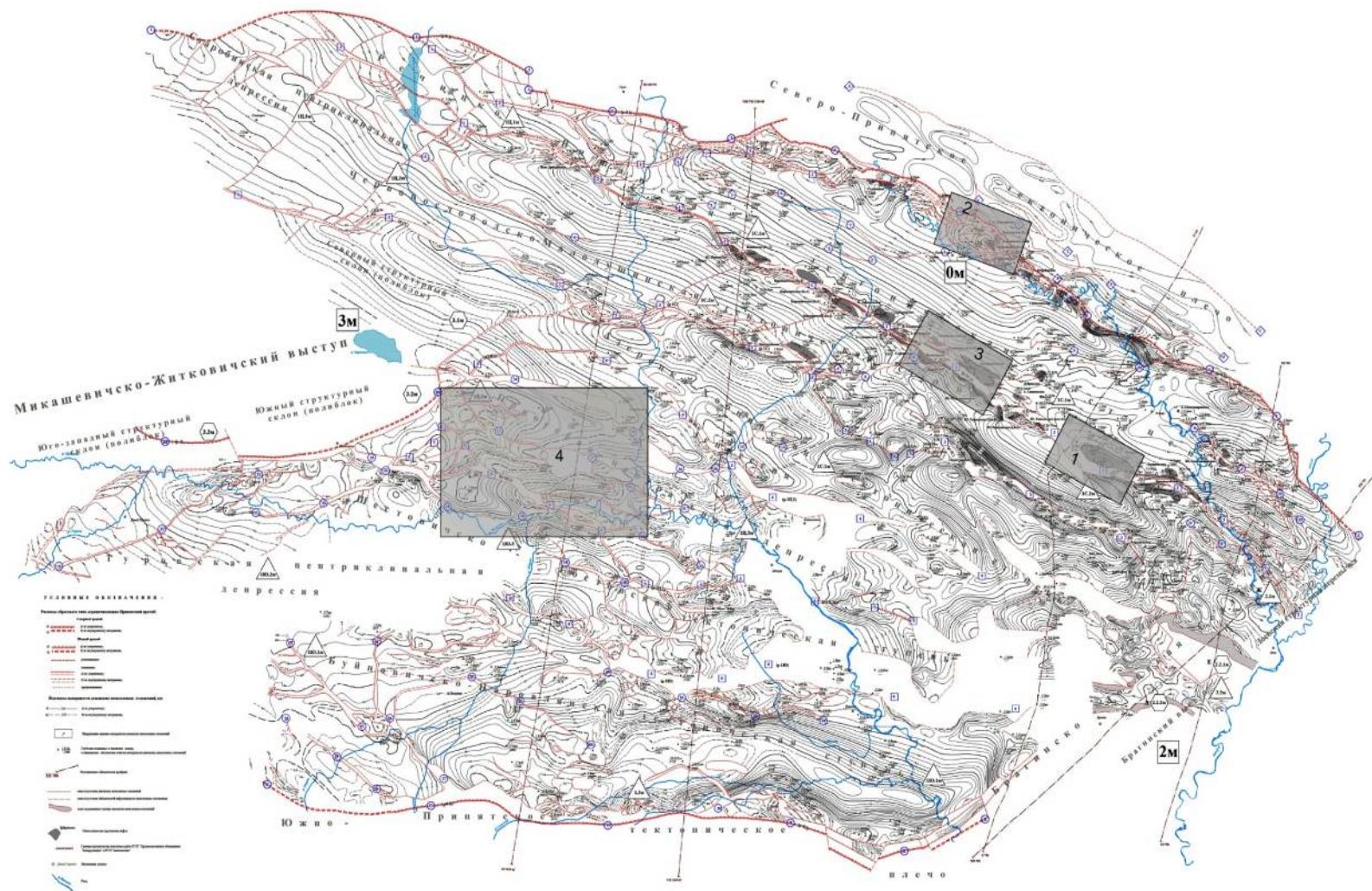


Рис. 11. Припятский прогиб. Карта распределения приоритетных нефтегазоперспективных объектов на структурной основе по межсолевому комплексу для системного геолого-геофизического изучения: 1 – Речицкий блок; 2 – Березинский полиблок; 3 – Осташковичский полиблок; 4 – Копаткевичско-Петриковский полиблок

Fig. 11. Pripyat deflection. Map of the distribution of priority oil and gas prospective objects on a structural basis across the inter-salt complex for systematic geological and geophysical study: 1 – Rechitsky block; 2 – Berezinsky polyblock; 3 – Ostashkovichi polyblock; 4 – Kopatkevich-Petrikovskiy polyblock

Второй тип включает структуры западной части Центральной зоны Припятского прогиба, где установлен достаточно высокий уровень прямых нефтегазопроявлений, – Петриковский полигон.

Предложение находится в реализации на Речицком полигоне с 2021 г. и планируется на Березинском полигоне в 2023 г.

**Геолого-геофизические исследования Восточной Антарктиды. Земля Эндерби.** Геолого-геофизические исследования Вечернегорской площади земли Эндерби затруднены из-за закрытости, поскольку только 1 % этой территории свободен от снежно-ледового покрова, с выходом коренных пород в узкой прибрежной полосе. Участок базирования и исследования Белорусской антарктической станции (БАС) располагается на Земле Эндерби в 30 км к востоку от станции Молодежная. Современный взгляд о геологических условиях прибрежной части Земли Эндерби в районе ст. Молодежная – БАС был определен благодаря:

- полевым геолого-геофизическим исследованиям, выполненным сотрудниками лаборатории геотектоники и геофизики в период Белорусских антарктических экспедиций (БАЭ; ВАЕ – Belarusian Antarctic Expeditions): БАЭ-2 (2008–2009 гг. – О. В. Мясников), БАЭ-7 (2014–2015 гг.), БАЭ-10 (2017–2018 гг.), БАЭ-13 (2020–2021 гг. – П. В. Шаблыко), БАЭ-14 (2021–2022 гг. – А. В. Хаткевич);

- профессиональному руководству ответственных исполнителей – доктора геолого-минералогических наук Г. И. Карапаева, доктора геолого-минералогических наук академика Р. Г. Гарецкого, кандидата геолого-минералогических наук Я. Г. Грибика;

- региональным геолого-геофизическим исследованиям в Восточной Антарктиде в районе Земли Эндерби, выполненных коллективом геологов и геофизиков ВНИИОкеангеологии (г. Санкт-Петербург).

По результатам выполненных геолого-геофизических исследований на Вечернегорской площади [13] выполнена региональная и детальная гравитационная и геомагнитная съемка, изучены горные породы с привязкой их к геофизическим полям и минерагеническим компонентам (рис. 12).

На основе изучения установлена разновозрастность коренных пород от древнейших плагиогнейсов архейского возраста (2,5 млрд лет) до верхнепротерозойского эндербит-чарнокитового комплекса (0,54 млрд лет).

По результатам обобщения геологических и геофизических данных определены участки, перспективные для выявления минерализации, рудных проявлений и залежей прогнозируемых полезных ископаемых, таких как алмазные кимберлиты, железо-титановая минерализация, вольфрам, молибден.

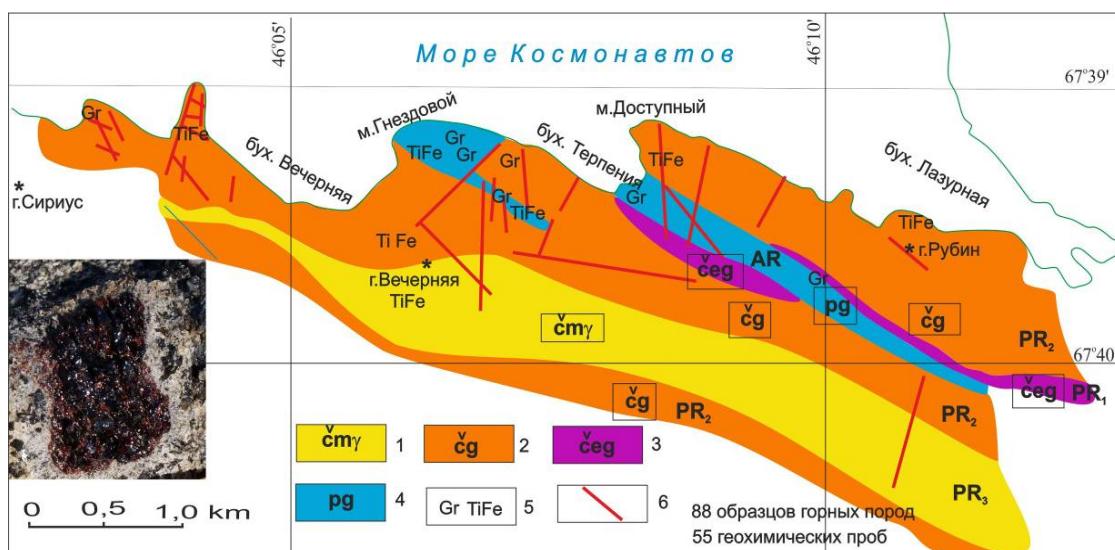


Рис. 12. Геологическая карта Вечернегорской площади (фрагмент):

- 1 – ультратемпературные полевошпат-кварц-плагиоклаз-амфиболитовые струйчатые рапакиви-гнейсовые чарнокиты; 2 – амфибол-полевошпат-кварц-плагиоклазовые чарнокиты;
  - 3 – гибридные амфибол-пироксен-плагиоклаз-кварц полевошпатовые чарнокитизированные эндербиты;
  - 4 – протолит-реликтовые двупироксеновые амфибол биотитовые плагиогнейсы.
- На вкладке – кристаллы пиропов участка мыса «Гнездовой»

Fig. 12. Geological map of Vechernegorskaya square (fragment):

- 1 – ultrametamorphic feldspar-quartz-plagioclase-amphibolite jet rapakivi-gneiss charnockites;
  - 2 – amphibole-feldspar-quartz-plagioclase charnockites;
  - 3 – hybrid amphibole-pyroxene-plagioclase-quartz feldspar charnockitized enderbites;
  - 4 – protolite-relict two-pyroxene amphibole biotite plagiogneis.
- On the tab – crystals of pyropes of the cape "Nest" site

В дополнение к исследованиям, выполнявшимся в предшествующий период, в последние годы расширен спектр геолого-геофизических исследований с выполнением рекогносцировочных радиометрических маршрутных исследований и шлиховое опробование перспективных участков. По результатам выполненных радиометрических исследований в сезон БАЭ-14 (2021–2022 гг.) выполнены измерения по десяти намеченным маршрутам. Всего произведено около 150 точек замеров [14]. По результатам обработки полевых данных построена предварительная картосхема интенсивности гамма-поля Вечернегорской площади (рис. 13).

Повышенное значение гамма-поля со значениями 200–300 мкР/ч связано непосредственно с выходом на поверхность древних архейских пород. На участках выхода на поверхность, располагающихся на более удаленной прибрежной полосе выхода верхнепротерозойского комплекса, интенсивность гамма-поля составляет 60–20 мкР/ч.

В будущем планируется провести детализационное изучение участков радиометрической съемки с помощью спектральных полевых исследований.

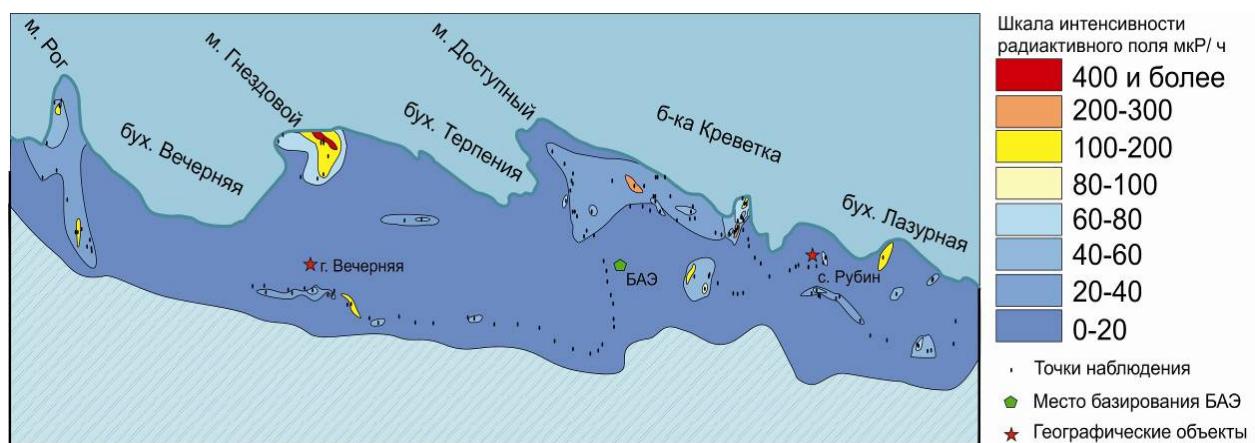


Рис. 13. Радиометрическая карта по данным сезона 2021–2022 гг.

Fig. 13. Radiometric map according to the data of the 2021–2022 season

**Заключение.** По результатам анализа геолого-геофизических разработок последнего 15-летнего периода в Институте природопользования НАН Беларуси определены значимые, имеющие фундаментальную и прикладную направленность, разработки. Значимость разработок определяется их научной и практической востребованностью, а также способностью отвечать на вопросы, возникшие в процессе геологического изучения недр Беларуси и смежных территорий.

Из шести проанализированных разработок фундаментального направления складывается следующая их приоритетность:

- геолого-геофизическая модель глубинного строения земной коры по глубинному профилю Георифт-2013;
- тектонофизическая модель вихревого (омутообразного) механизма формирования Слободского узла;
- нетрадиционные источники углеводородного сырья в недрах Беларуси.

Из шести проанализированных геологических разработок прикладного направления складывается следующая их приоритетность:

- карты структурного районирования перспективных комплексов Припятского прогиба для решения задач эффективного освоения ресурсов углеводородов;
- геологическая оценка залежи нефти на Познякевичской площади;
- системные исследования приоритетных геологических объектов в Припятском прогибе с целью увеличения углеводородного потенциала;
- геолого-геофизические исследования Восточной Антарктиды, Земля Эндерби.

Реализация всех проанализированных разработок 15-летнего периода позволяет значительно повысить геологическую изученность территории Беларуси, а разработки, определяемые по приоритетности, значительно ускорят этот процесс.

### Список использованных источников

1. Разломы земной коры Беларуси / Р. Е. Айзберг [и др.] / под ред. Р. Е. Айзберга. – Минск : КрасикоПринт, 2007. – 372 с.
2. Айзберг, Р. Е. Синрифтовая геодинамика Припятского прогиба / Р. Е. Айзберг, Т. А. Старчик. – Минск : Беларуская наука, 2013. – 146 с.
3. Гарецкий, Р. Г. Эколого-тектонофизическая среда Беларуси / Р. Г. Гарецкий, Г. И. Карапаев. – Минск : Беларуская наука, 2015. – 175 с.
4. Гарецкий, Р. Г. Шовные зоны Фенноскандии, Сарматии, Волго-Ураллии / Р. Г. Гарецкий, Г. И. Карапаев. – Минск : Беларуская наука, 2014. – 120 с.
5. Litospheric structure along wide-angle seismic profile GEORIFT 2013 in Pripyat-Dnieper-Donets Basin (Belarus and Ukraine) / V. Starostenko [et al.] // Geophysical Journal International. – 2018. – Vol. 212, № 3. – P. 1932–1982.
6. Нетрадиционные источники углеводородного сырья в недрах Беларуси: геологические аспекты / Р. Е. Айзберг, Я. Г. Грибик, В. Н. Бескопыльный, Е. Ф. Никуленко. – Минск : Беларуская наука, 2022. – 332 с.
7. Айзберг, Р. Е. Карта структурного районирования подсолевого комплекса Припятского прогиба для решения эффективного освоения ресурсов углеводородов. Масштаб 1 : 200 000 / Р. Е. Айзберг, В. Н. Бескопыльный, Я. Г. Грибик. – Минск : Белкартография, 2011.
8. Айзберг, Р. Е. Карта структурного районирования межсолевого комплекса Припятского прогиба для решения эффективного освоения ресурсов углеводородов. Масштаб 1 : 200 000 / Р. Е. Айзберг, В. Н. Бескопыльный, Я. Г. Грибик. – Минск : Белкартография, 2011.
9. Грибик, Я. Г. Геологические исследования недр Беларуси по проектному профилю «Восточный» / Я. Г. Грибик, Р. Е. Айзберг // Современные проблемы геохимии, геологии и полезных ископаемых : материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 110-летию со дня рожд. акад. К. И. Лукашёва. – Минск : БГУ, 2017. – С. 18–20.
10. Грибик, Я. Г. Проявление природной аномалии ртути в Беларуси / Я. Г. Грибик // Літасфера. – 2020. – № 1 (52). – С. 60–67.
11. Грибик, Я. Г. Геологическая оценка Ельской (Познякевичской) залежи нефти в Припятском прогибе / Я. Г. Грибик // Літасфера. – 2016. – № 2 (45). – С. 85–98.
12. Грибик, Я. Г. Системные исследования приоритетных геологических объектов в Припятском прогибе с целью увеличения углеводородного потенциала / Я. Г. Грибик, Р. Е. Айзберг, Р. Г. Гарецкий // Доклады НАН Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 5. – С. 608–617.
13. Белорусские геолого-геофизические исследования на Земле Эндерби / Р. Г. Гарецкий, Г. И. Карапаев, О. В. Мясников, И. В. Данкевич // Беларусь в Антарктике. – Минск : Беларуская наука, 2016. – С. 102–117.
14. Карапаев, Г. И. Геолого-геофизические исследования (изучение магнитного поля и его интерпретация) / Г. И. Карапаев, П. В. Шаблыко // Научные исследования Беларуси в Антарктике. – Минск : Беларуская наука, 2021. – С. 106–117.

### References

1. Aizberg R. E. [et al.]. *Razlomi zemnoi kori Belarusi* [Faults of the Earth's crust of Belarus. Ed. by R. E. Eisberg]. Minsk, KrasikoPrint Publ., 2007, 372 p. (in Russian)
2. Aizberg R. E., Starchik T. A. *Sinriftovaya geodinamika Pripyatskogo progiba* [Synrift Geodynamics of the Pripyat Trough]. Minsk, Belarusian Science Publ., 2013, 146 p. (in Russian)
3. Gareckii R. G., Karataev G. I. *Ekologo-tektonofizicheskaya sreda Belarusi* [Ekologo-tectonophysical sreda Belarusi]. Minsk, Belarusskaya navuka Publ., 2015, 175 p. (in Russian)
4. Gareckii R. G. Karataev G. I. *Shovnie zoni Fennoskandii, Sarmatii, Volgo-Uralii* [Sutures zoni Fennoskandii, Sarmatii, Volga-Uralii]. Minsk, Belarusskaya navuka Publ., 2014, 120 p. (in Russian)
5. Starostenko V. [et al.]. Litospheric structure along wide-angle seismic profile GEORIFT 2013 in Pripyat-Dnieper-Donets Basin (Belarus and Ukraine). *Geophysical Journal International*, 2018, vol. 212, no. 3, pp.1932–1982.
6. Aizberg R. E., Gribik Ya. G., Beskopilnii V. N., Nikulenka E. F. *Netradicionnie istochniki uglevodorodnogo srya v nedrah Belarusi: geologicheskie aspekty* [Unconventional sources of hydrocarbon raw materials in the bowels of Belarus: geological aspects]. Minsk, Belarusskaya navuka Publ., 2022, 332 p. (in Russian)
7. Beskopyl'nyj V. N., Ajzberg R. E., Gribik Ya. G. *Karta strukturnogo rajonirovaniya podsolevogo kompleksa Pripyatskogo progiba dlya resheniya zadach effektivnogo osvoeniya resursov uglevodorodov. Masshtab 1 : 200 000* [Map of structural zoning of subsalt complex of the Pripyat Trough for solving problems of effective development of hydrocarbon resources. Scale 1 : 200 000]. Minsk, Belkartografija Publ., 2011. (in Russian)
8. Beskopyl'nyj V. N., Ajzberg R. E., Gribik Ya. G. *Karta strukturnogo rajonirovaniya mezhsolevogo kompleksa Pripyatskogo progiba dlya resheniya zadach effektivnogo osvoeniya resursov uglevodorodov. Masshtab 1 : 200 000* [Map of structural zoning of intersalt complex of the Pripyat Trough for solving problems of efficient development of hydrocarbon resources. Scale 1 : 200 000]. Minsk, Belkartografija Publ., 2011. (in Russian)
9. Gribik Ya. G., Aizberg R. E. *Geologicheskie issledovaniya nedr Belarusi po proektnomu profilyu "Vostochnii"* [Geological research of the bowels of Belarus on the project profile "Vostochny"]. Sovremennye problemy geohimii, geologii i poleznyh iskopayemyh: materialy Mezhdunar. nauch. konf., posviash. 110-letiyu so dnya rozhd. akad. K. I. Lukashyova [Proc. of Int. Sci. Conf. "Modern problems of geochemistry, geology and minerals", dedicated to the 110th anniversary of the birth of Academician K. I. Lukashev]. Minsk, BGU Publ. 2017, pp. 18–20. (in Russian)
10. Gribik Ya. G. *Proyavlenie prirodnoi anomalii rtuti v Belarusi* [Manifestation of natural mercury anomaly in Belarus]. *Litasfera*, 2020, no. 1 (52), pp. 60–67. (in Russian)

11. Gribik Ya. G. *Geologicheskaya ocenka El'skoj (Poznyakevichskoj) zalezhi nefti v Pripyatskom progibe* [Geological assessment of the Elsko (Poznyakevichskaya) oil deposit in the Pripyat trough]. *Lithosphere*, 2016, no. 2 (45), pp. 85–98. (in Russian)
12. Gribik Ya. G., Aizberg R. E., Gareckii R. G. *Sistemnie issledovaniya prioritetnih geologicheskikh obektov v Pripyatskom progibe s celyu uvelicheniya uglevodorochnogo potenciala* [Systematic studies of priority geological objects in the Pripyat trough in order to increase the hydrocarbon potential]. *Doklady NAN Belarusi* [Reports of the NAS of Belarus]. – 2021. Vol. 65, no. 5, pp. 608–617. (in Russian)
13. Gareckij R. G., Karataev G. I., Myasnikov O. V., Dankevich I. V. *Belorusskie geologo-geofizicheskie issledovaniya na Zemle Enderbi* [Belarusian geological and geophysical studies on Enderby Land]. Belarus in Antarctica. Minsk, Belarusskaya navuka Publ., 2016, pp. 102–117. (in Russian)
14. Karataev G. I., Shablyko P. V. *Geologo-geofizicheskie issledovaniya (izuchenie magnitnogo polya i ego interpretaciya)* [Geological and geophysical research (study of the magnetic field and its interpretation)]. Scientific research of Belarus in Antarctica. Minsk, Belarusskaya navuka Publ., 2021, pp. 106–117. (in Russian)

### Информация об авторах

*Грибик Ярослав Гаврилович* – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией геотектоники и геофизики, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yaroslavgribik@tut.by

*Гарецкий Радим Гаврилович* – академик, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

*Гирин Роберт Эдмундович* – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: ip-clm@mail.ru

### Information about the authors

*Yaroslav G. Gribik* – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Head of the Laboratory of Geotectonics and Geophysics, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yaroslavgribik@tut.by

*Radim G. Garetsky* – Academician, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

*Robert E. Girin* – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, (10, F. Skoryna Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: ip-clm@mail.ru

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНСТИТУТА ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НАН БЕЛАРУСИ В ОБЛАСТИ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ И ПАЛЕОГЕОГРАФИИ КАЙНОЗОЯ

Е. А. Кухарик, А. В. Матвеев, Т. Б. Рылова, В. П. Зерницкая

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** В статье представлены основные результаты научных исследований в области современной геодинамики и палеогеографии кайнозоя, полученные за последние пятнадцать лет. На основании изучения проявления современных эндогенных, экзогенных и техногенных геологических процессов составлены схемы их площадного распространения, охарактеризовано влияние геологических факторов на комфортность проживания населения, охарактеризованы геохимический фон четвертичных отложений и радоновое поле территории Беларуси. В рамках изучения динамики природных обстановок в плейстоцене и голоцене на территории Беларуси и прилегающих регионов Литвы, Польши, Украины и России получены палинологические данные для отложений муравинского межледниковья и позднеледниково-голоцен, реконструированы палеорельеф и палеоландшафты оптимальных фаз названных временных интервалов квартера, разработаны и утверждены соответствующие хроностратиграфические схемы, выполнена межрегиональная хроностратиграфическая и палеоклиматическая корреляция палеогеографических событий плейстоцена и позднеледниково-голоцен со смежными с Беларусью регионами.

**Ключевые слова:** геология; современная геодинамика; экологическая геология и геохимия; стратиграфия; палеогеография; кайнозой; плейстоцен; позднеледниковые; голоцен.

**Для цитирования.** Кухарик Е. А., Матвеев А. В., Рылова Т. Б., Зерницкая В. П. Основные результаты научных исследований Института природопользования НАН Беларуси в области современной геодинамики и палеогеографии кайнозоя // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 68–85.

## THE MAIN RESULTS OF THE SCIENTIFIC STUDIES OF THE INSTITUTE OF NATURE MANAGEMENT OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS IN THE AREA OF MODERN GEODYNAMICS AND PALEOGEOGRAPHY OF THE CENOZOIC

Е. А. Кухарик, А. В. Матвеев, Т. Б. Рылова, В. П. Зерницкая

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** The main results of scientific studies in the area of modern geodynamics and paleogeography of the Cenozoic obtained for the recent fifteen years are given in the article. The schemes of their area distribution are created on the base of the indicates study of modern endogenic and technogenic processes, the influence of geological factors on population dwelling comfort is characterized, the geochemical background of the quaternary sediments and radon field on the territory of Belarus are characterized. The palynological data for the sediments of the Muravinsky Interglacial and the Late Glacial-Holocene are obtained in the frameworks of the study of the dynamics of the adjoined regions of Lithuania, Poland, Ukraine and Russia, the paleorelief and paleolandscape of the optimal phases of the named time intervals of the quarter are reconstructed, corresponding chronostratigraphic schemes are developed and approved, the interregional chronostratigraphic and paleoclimatic correlation of paleogeographic events of the Pleistocene and the Late Glacial-Holocene to the adjacent regions to Belarus is done.

**Keywords:** geology; modern geodynamics; ecological geology and geochemistry; stratigraphy; paleogeography; Cenozoic; Pleistocene; Late Glacial; Holocene.

**For citation.** Kukharik E. A., Matveyev A. V., Rylova T. B., Zernitskaya V. P. The main results of the scientific studies of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus in the area of modern geodynamics and paleogeography of the Cenozoic. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 68–85.

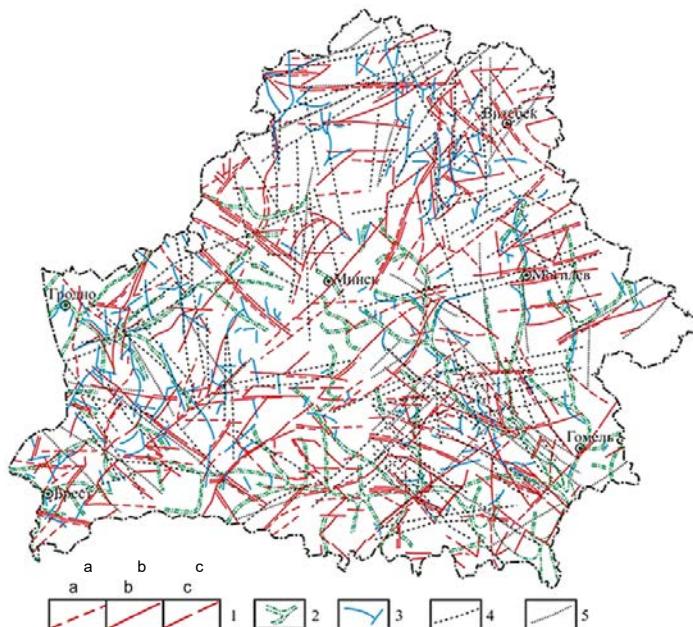
**Введение.** В Институте природопользования НАН Беларуси научные исследования в области современной геодинамики, экологической геологии и геохимии, стратиграфии и палеогеографии кайнозоя выполняются сотрудниками лаборатории современной геодинамики и палеогеографии в рамках государственных программ научных исследований, заданий Белорусского фонда фундаментальных исследований и международных проектов. В настоящее время коллектив лаборатории состоит из шести научных сотрудников (академик, доктор наук, два кандидата наук и два специалиста без ученой степени). Под руководством академика А. В. Матвеева развивается научная школа «Четвертичная геология, геоморфология и палеогеография».

Выполняемые работы направлены на решение актуальных задач наук о Земле, среди которых: изучение особенностей развития современных эндогенных, экзогенных и техногенных геологических процессов, их картирование и оценка негативных последствий проявления современной геодинамики с целью районирования территории Беларуси по степени комфортности геологической среды для жизнедеятельности населения; разработка и совершенствование стратиграфических схем неогеновых, четвертичных и позднеледниково-голоценовых отложений, которые используются при проведении научно-исследовательских, геолого-съемочных и геологоразведочных работ в республике. Краткому освещению полученных по этим научным направлениям результатов посвящена настоящая статья.

**Современная геодинамика, экологическая геология и геохимия.** На основании комплексного анализа особенностей строения толщи четвертичных отложений, рельефа земной поверхности, геофизических и геохимических данных выявлены геоактивные зоны на территории Беларуси, представленные космо- и тополинеаментами, активизированными разломами (рис. 1). Установлено, что в геоактивных зонах ряд факторов (формирование комплексных геохимических и геофизических аномалий, объемная активность радона в поровом воздухе, возрастание скоростей вертикальных и горизонтальных движений земной коры, повышение балльности сейсмических событий) оказывают существенное воздействие на геэкологическую обстановку, что приводит к ухудшению условий проживания человека (нарушение целостности зданий и сооружений, формирование геохимических и геофизических аномалий в покровных отложениях, ухудшение качества питьевых вод, сбои в работе электроаппаратуры, повышение аварийности), в 1,2–3,0 раза возрастает заболеваемость населения (академик А. В. Матвеев, Л. А. Нечипоренко, В. П. Зерницкая, Е. А. Кухарик, С. В. Ракеть) [1–3].

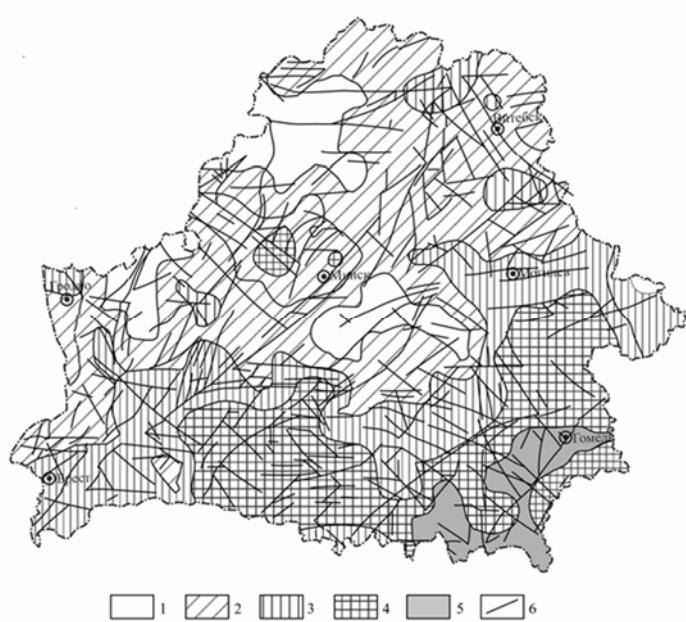
В 2017 г. завершены совместные белорусско-украинские исследования природных и природно-антропогенных опасностей на территории Беларуси и Украины. Разработана типизация проявляющихся на территории Беларуси природных и природно-антропогенных опасностей литосферного класса (эндогенных, экзогенных, техногенных), включающая 6 подтипов, в которых различается по 1–2 группы, в группах – по 2 подгруппы, в подгруппах – 31 вид. Показано, что их развитие обусловлено особенностями глубинного строения, наличием сети разрывных нарушений, распространением в верхней части платформенного чехла определенного типа отложений (лессовидных пород, мела, глин и др.), характером рельефа земной поверхности, степенью техногенной преобразованности и т. д. [4]. Выполнено районирование территории страны по степени неблагоприятности последствий проявления опасностей литосферного класса (рис. 2), разработаны рекомендации по минимизации негативных последствий их реализации (академик А. В. Матвеев, Л. А. Нечипоренко, Е. А. Кухарик, С. В. Ракеть) [5–8].

А. В. Матвеевым совместно с В. Е. Бордоном на основании выполненного районирования территории Беларуси по особенностям разреза четвертичных отложений охарактеризовано площадное распределение основных породообразующих микроэлементов, выявлены ведущие геохимические ассоциации. Установлено, что в зонах активизированных разрывных нарушений и районах интенсивного техногенного воздействия формируются устойчивые геохимические аномалии: в зонах разломов в 1,1–2,6 раза возрастают концентрации хрома, никеля, кобальта, марганца, бериллия по сравнению с фоновыми, в меньшей степени – титана, иттрия; на урбанизированных территориях, вблизи крупных промышленных объектов, на площадях бывших военных баз, вдоль автомобильных дорог и других объектов концентрации микроэлементов в основном не превышают предельно допустимые концентрации (ПДК), однако на отдельных участках содержание свинца, никеля, цинка, меди, фтора и других элементов может достигать 1,2–2,0 ПДК (единично – до 10,0–15,0 ПДК). Проведено районирование территории страны по степени эколого-геохимического риска (рис. 3). Полученные материалы легли в основу монографии «Геохимия четвертичных отложений Беларуси» [9].



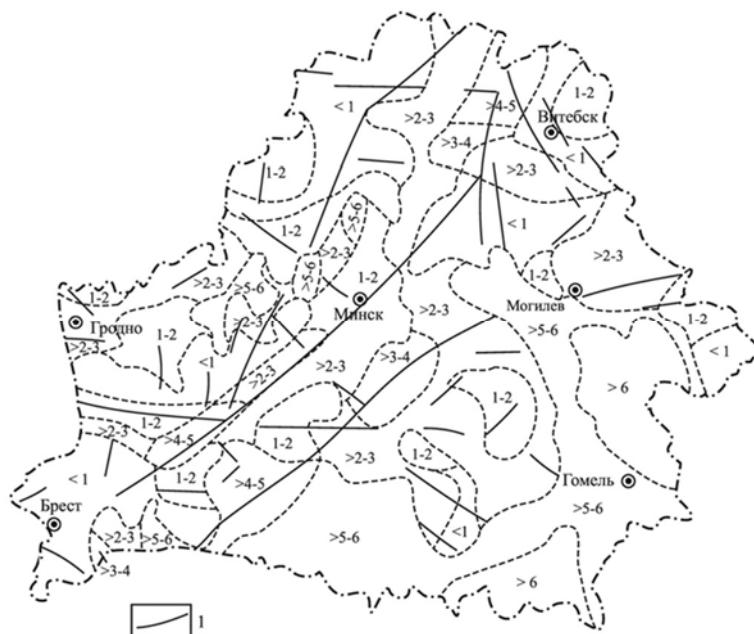
**Рис. 1. Геоактивные зоны на территории Беларуси: 1 – разрывные нарушения, проявлявшие активность в позднеплейстоцен-голоценовое (а), поздне-среднеплейстоценовое (б) и раннеплейстоценовое (с) время; 2 – погребенные речные долины; 3 – погребенные ледниковые ложбины; 4 – наиболее протяженные космолинеаменты; 5 – наиболее протяженные тополинеаменты [1]**

**Fig. 1. Geoactive zones on the territory of Belarus: 1 – faults that were active in the Late Pleistocene-Holocene (a), Late Middle Pleistocene (b) and Early Pleistocene (c) time; 2 – buried river valleys; 3 – buried glacial troughs; 4 – the longest cosmolineaments; 5 – the longest topolineaments [1]**



**Рис. 2. Районирование территории Беларуси по степени неблагоприятности проявления природных и природно-антропогенных опасностей литосферного класса. Степень неблагоприятности (оценка в баллах): 1 – незначительная (1–5); 2 – умеренная (6–15); 3 – повышенная (16–25); 4 – высокая (26–35); 5 – весьма высокая (более 35); 6 – весьма высокая (более 35) в зонах активных разломов [6]**

**Fig. 2. Zoning of the territory of Belarus according to degree of adverse of nature and nature-anthropogenic hazards manifestations of the lithospheric class. The degree of adverse (estimation in points): 1 – insignificant (1–5); 2 – moderate (6–15); 3 – increased (16–25); 4 – high (26–35); 5 – very high (more than 35) in the zones of active faults [6]**



**Рис. 3. Районирование территории Беларуси по степени эколого-геохимического риска:**

1 – линейные участки повышенного и высокого эколого-геохимического риска в зонах суперрегиональных и региональных активных на современном этапе разрывных нарушений; площади с незначительной (<1 балла), невысокой (1–2), умеренной (>2–3), средней (>3–4), повышенной (>4–5), высокой (>5–6) степенью риска и экологического кризиса (>6 баллов) [9]

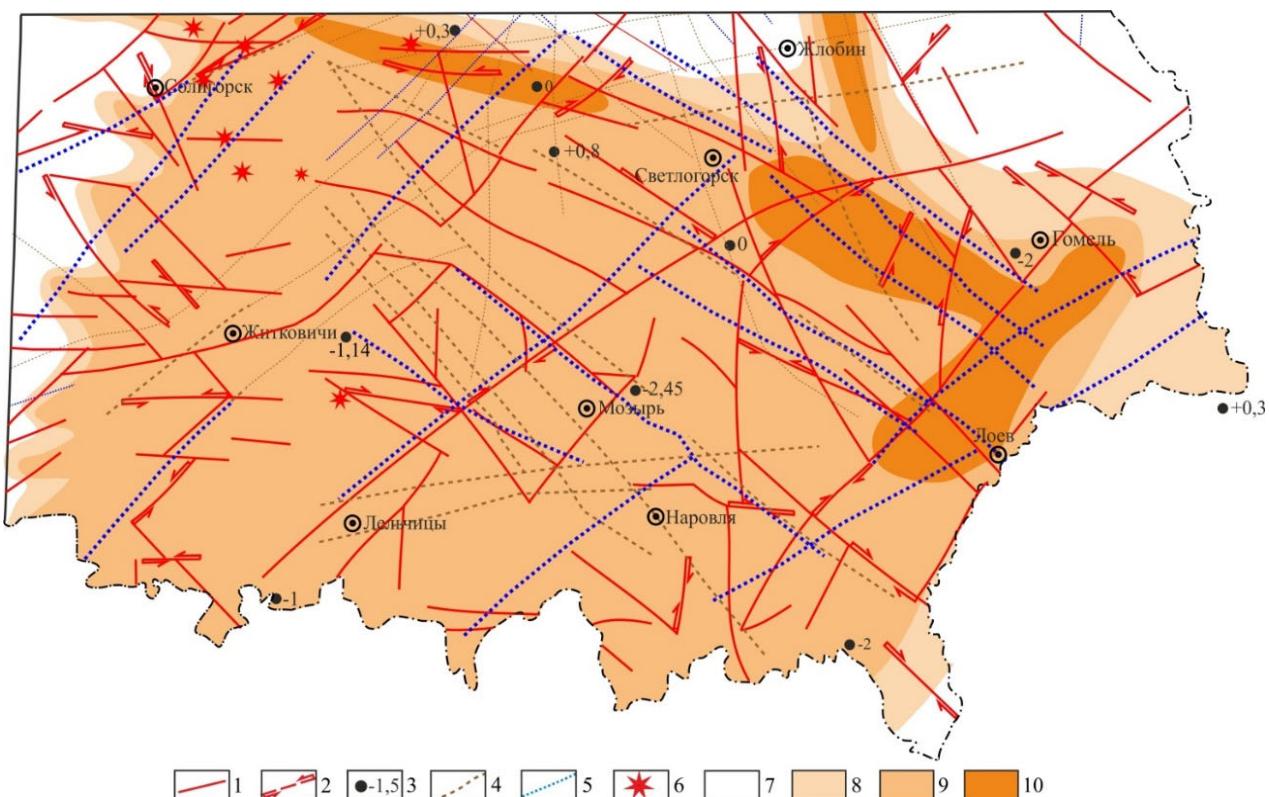
**Fig. 3. Zoning of the territory of Belarus according to degree of ecological and geochemical risk:**  
**1 – linear areas of increased and high ecological and geochemical risk in the zones of currently active super-regional and regional faults; areas with insignificant (<1 points), low (1–2), moderate (>2–3), medium (>3–4), increased (>4–5), high (>5–6) risk and ecological crisis (>6 points) [9]**

Отдельно следует остановиться на исследованиях по радоновой проблематике, которые выполнялись в лаборатории в течение последнего десятилетия академиком А. В. Матвеевым и продолжаются в настоящее время в сотрудничестве со специалистами Института радиобиологии НАН Беларуси М. И. Автюшко и С. А. Исаченко. Установлено, что в зонах активизированных разломов объемная активность радона в основном составляет от 10 000 до 70 000 Бк/км<sup>2</sup>, реже – более, что в 1,5–3,0 раза (единично до 5,0 раза) превышает фоновые значения. Доказано, что в значениях объемной активности радона на грунтовую (местную) составляющую приходится 10–50 %, на глубинный радон – 50–90 %, а наибольшие значения глубинных поступлений связаны с зонами разломов. Рассчитана общая объемная активность радона в наиболее распространенных типах пород кристаллического фундамента и платформенного чехла, составлена оригинальная схема районирования территории Беларуси по степени радоновой опасности. Показана значимая роль радона, поступающего к земной поверхности из атмосферы, в формировании уровня его концентрации в приземных слоях атмосферного воздуха. Выявлена устойчивая зависимость уровня концентрации радона в приземной атмосфере от влажности воздуха вследствие его сорбции микрокаплями воды. Установлена тесная корреляционная связь между количеством грунтового радона и силой гравитационного лунно-солнечного воздействия на земную кору. Эти результаты опубликованы в 2017 г. в виде монографии «Радон в геологических комплексах Беларуси» [10] и серии статей [11–17].

В 2016–2020 гг. выполнялись комплексные работы по изучению особенностей проявления современных геологических процессов на территории Белорусского Полесья с целью ее районирования по степени экологической безопасности. Показано, что несмотря на расположение региона в пределах древней Восточно-Европейской платформы и преобладание выровненного рельефа земной поверхности, в рассматриваемом регионе довольно активно проявляются современные эндогенные (вертикальные и горизонтальные движения земной коры, сейсмичность, геодинамические процессы в зонах активизированных разломов), экзогенные (водно-эрзационные – плоскостная и овражная эрозия, эрозионно-аккумулятивная деятельность в долинах рек), гравитационные (осыпи, обвалы, оползни), эоловые, карстовые, суффозионные и биогенные) и техногенные (перемещение огромных объемов грунтов при реализации различных строительных работ и добыче полезных ископаемых, загрязнение покровных отложений и подземных вод в результате хозяйственной деятельности человека) геологические процессы.

Для картирования площадного распространения перечисленных групп процессов была разработана методика и составлены оригинальные схемы для западного и восточного районов Полесского региона в масштабе 1 : 500 000 (рис. 4).

Установлено, что интенсивность проявления современной геодинамики в отдельных случаях может достигать значительных величин, приводить к негативным последствиям для природной среды и условий жизнедеятельности человека (нарушению природных и природно-антропогенных комплексов, формированию экономического ущерба, ухудшению условий проживания населения и повышению заболеваемости). Обоснованы критерии оценки степени благоприятности (комфортности) геологической среды для жизнедеятельности населения, которые послужили базисом для построения схем районирования по данному показателю территорий западного и восточного районов Белорусского Полесья в масштабе 1 : 500 000 с выделением таксонов с высокой, относительно высокой, умеренной, пониженной, низкой и весьма низкой степенями комфортности для населения (академик А. В. Матвеев, Л. А. Нечипоренко, Е. А. Кухарик) [18–23]. Подобные работы по территории Белорусского Поозерья завершены в 2020 г. академиком А. В. Матвеевым и В. П. Зерницкой [24, 25].



**Рис. 4. Схема современной эндогенной геодинамики территории восточной части Белорусского Полесья:**  
 1 – высокие градиенты скоростей вертикальных движений земной коры в зонах активных разломов;  
 2 – участки проявления горизонтальных движений; 3 – отдельные значения скоростей вертикальных движений, мм/год; 4–5 – геодинамические процессы в зонах наиболее протяженных космolineаментов (4) и тополинеаментов (5); 6 – эпицентры землетрясений; 7–10 – территории, в пределах которых возможны проявления сейсмических процессов интенсивностью менее 5 баллов (7), 5–6 баллов (8), 6–7 баллов (9), 7 баллов (10) [20]

**Fig. 4. Scheme of modern endogenic geodynamics in the eastern part of the Belarusian Polesye area:**  
 1 – high gradients of vertical movements velocity of the earth's crust within the active fault zones;  
 2 – areas of evident horizontal movements; 3 – values of the vertical movement velocities, mm/year;  
 4–5 – geodynamic processes within the most extensive cosmolineaments (4) and topolineaments (5);  
 6 – earthquake epicenters; 7–10 – areas where seismic processes of magnitude less than 5 points (7), 5–6 points (8), 6–7 points (9), 7 points (10) are observed [20]

В настоящее время в лаборатории современной геодинамики и палеогеографии выполняются работы в рамках Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы по изучению проявлений современных геологических процессов на

территории Центральной Беларуси. Охарактеризованы предопределенные особенностями геолого-геоморфологического строения исследуемого региона современные экзогенные геологические процессы (плоскостной смыв, овражная (линейная) эрозия временных водотоков, карст, суффозия, гравитационные (осыпи, обвалы, оползни), эоловые (дефляция и эоловая аккумуляция), биогенные (торфонакопление и заболачивание земель) процессы, речная эрозия и аккумуляция, эрозионно-аккумулятивные процессы в зонах водохранилищ и прудов, подтопление), составлена соответствующая схема масштаба 1 : 500 000.

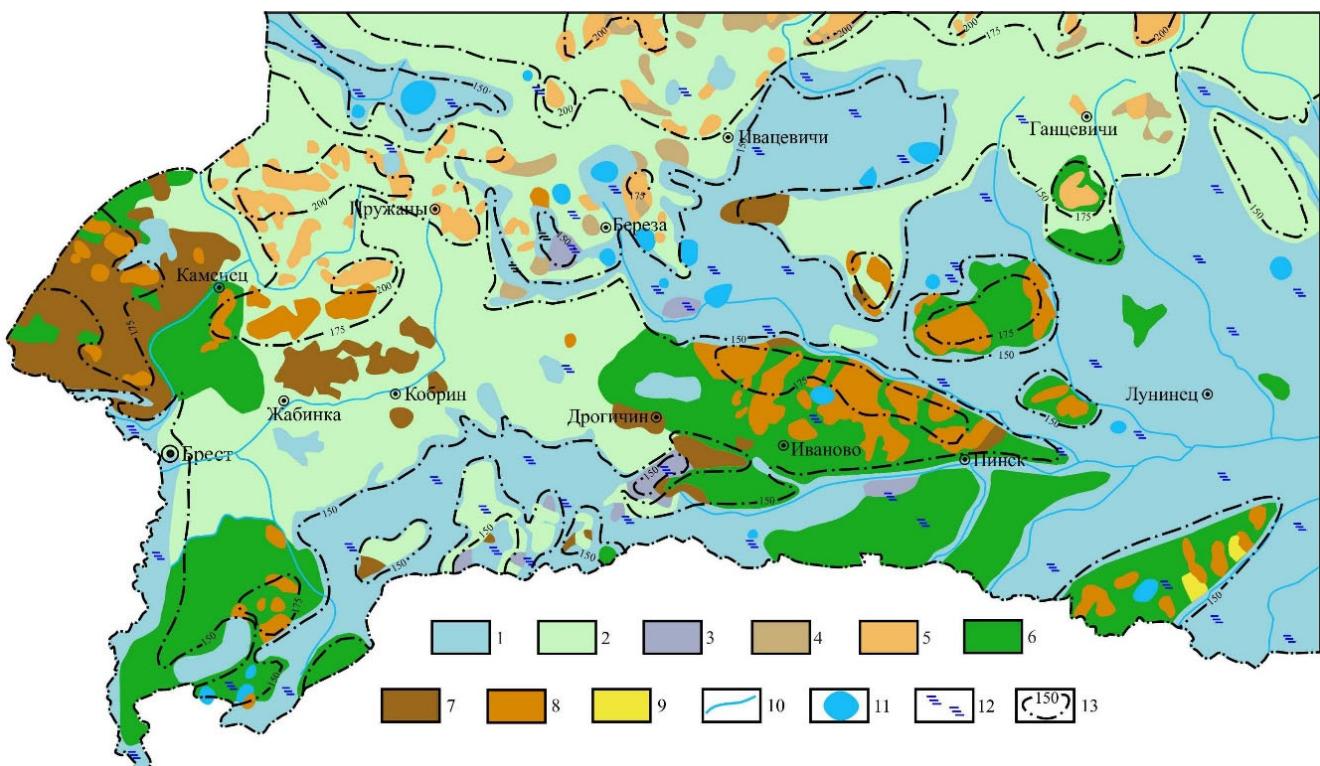
**Стратиграфия и палеогеография кайнозоя.** В лаборатории исследуются вопросы стратиграфии и палеогеографии неогена, плейстоцена и голоценов территории Беларуси и прилегающих районов соседних стран. Сотрудники лаборатории принимали участие в разработке, обсуждении и утверждении в 2010 г. третьего поколения Стратиграфических схем неогеновых (Т. Б. Рылова), четвертичных (академик А. В. Матвеев, академик А. К. Карабанов, Т. Б. Рылова) и позднеледниково-голоценовых (В. П. Зерницкая, академик А. В. Матвеев) отложений Беларуси, которые отличаются большей детальностью и обоснованностью фактического материала по сравнению с предыдущими вариантами схем [26]. В 2019 г. при участии академика А. В. Матвеева и Т. Б. Рыловой были завершены исследования, позволившие обосновать понижение нижней границы квартера с уровня 1,8 млн лет на уровень 2,58 млн лет с целью приведения Стратиграфических схем неогеновой и четвертичной систем Беларуси в соответствие с решением Международного союза геологических наук. Из неогеновой системы Беларуси изъят дворецкий горизонт как аналог гелазия и перемещен в основание нижнего подотдела четвертичной системы. В плиоцене исключен колочинский надгоризонт; отдел стал двучленным и состоит из холмечского горизонта с двумя подгоризонтами – нижнехолмечским и верхнехолмечским. Введен новый местный стратон плиоцена – кремушевская свита с двумя подсвитами. В дворецком горизонте выделены ольховский (нижний) и любчанский (верхний) подгоризонты. Граница «неоген – квартер» на территории Беларуси проводится между холмечским и дворецким горизонтами [27, 28].

Выполнено биостратиграфическое расчленение межледниковых, ранне- и позднеледниковых отложений по материалам исследований более 180 геологических разрезов на территории Беларуси на ряд локальных и региональных пыльцевых зон. Охарактеризованы последовательные фазы развития растительности, существовавшей на протяжении межледниковых интервалов плейстоцена, а также начальных и заключительных этапов ледниковых эпох. Полученные материалы свидетельствуют о том, что процесс развития флоры и растительности был индивидуальным для каждого межледникового, что доказывается определенной для разных межледниковых последовательностью пыльцевых зон и свидетельствует о различных климатических условиях каждой межледниковой эпохи. Выполнена реконструкция динамики палеотемпературных показателей для хронологически последовательных фаз развития растительности межледниковых эпох. По палинологическим данным построены климатофитоценотические сукцессии на территории Беларуси в плейстоцене [26, 29, 30].

Важные научные результаты были получены при выполнении исследований эволюции ландшафтов в позднем плейстоцене и голоцене на территории западной и восточной частей Белорусского Полесья.

С учетом особенностей таксономического состава и количественного содержания пыльцы в спектрах локальных пыльцевых зон, выделенных в разрезах, расположенных в пределах исследованной территории и приграничных районах Польши, Украины и России и их сравнительного анализа с соответствующими данными по другим регионам Беларуси обоснованы новые палиностратиграфические схемы муравинских межледниковых отложений для западного и восточного районов Белорусского Полесья, уточняющие региональную хроностратиграфическую схему позднего плейстоцена. Охарактеризованы девять фаз развития растительности на протяжении муравинского межледникового, построена модель динамики растительного покрова и палеотемпературных показателей на протяжении рассматриваемого интервала плейстоцена. Установлено, что палеотемпературы имели максимальные значения в фазу  $t_{II}$ : для западного Полесья –  $t_{II} = +19 \dots +23^{\circ}\text{C}$  (средняя  $+21^{\circ}\text{C}$ ),  $t_1 = +4 \dots -4^{\circ}\text{C}$  (средняя  $0^{\circ}\text{C}$ ), т. е. июльские температуры муравинского оптимума были выше современных примерно на  $2,5^{\circ}\text{C}$ , а январские – на  $4,5^{\circ}\text{C}$ ; для восточного Полесья –  $t_{II} = +18 \dots +23^{\circ}\text{C}$  (средняя  $+20,5^{\circ}\text{C}$ ),  $t_1 = +4 \dots -4^{\circ}\text{C}$  (средняя  $0^{\circ}\text{C}$ ), т. е. несколько ниже, чем полученные для западной части Белорусского Полесья. Июльские температуры муравинского оптимума в регионе исследований были выше современных в южной части Беларуси примерно на  $1,5^{\circ}\text{C}$ , а январские – на  $4,25^{\circ}\text{C}$  (Т. Б. Рылова, И. Е. Савченко, А. В. Шидловская) [31–33].

Построены оригинальные схемы палеорельефа для западного (рис. 5) и восточного районов Белорусского Полесья в муравинском межледниковье. Установлено, что в рельефе земной поверхности преобладали те же генетические типы, что и в настоящее время, хотя существовали и некоторые различия. В частности, в муравинское время в рельефе относительно большие площади занимали флювиогляциальные и моренные поверхности, а в современном – аллювиальные и озерно-аллювиальные, на 10–20 м были ниже краевые ледниковые образования. Только в земной поверхности межледникового этапа были выделены участки днепровских озерно-ледниковых и дочетвертичных денудационных низин. В отличие от муравинского рельефа, в современном рельефе отмечены формы эолового, гравитационного и эрозионного генезиса (академик А. В. Матвеев, В. П. Зерницкая) [34–36].



**Рис. 5. Палеогеоморфологическая схема территории Брестского Полесья (муравинское межледникование):**  
1 – плоские озерно-аллювиальные низины муравинского возраста;

2 – полого-волнистые флювиогляциальные низины (равнины) соожского возраста;

3 – плоские озерно-ледниковые низины соожского возраста; 4 – волнистые, полого-волнистые и мелкохолмистые моренные равнины соожского возраста; 5 – грядово-холмистые краевые ледниковые образования соожского возраста; 6 – полого-волнистые флювиогляциальные низины (равнины) днепровского возраста; 7 – полого-волнистые моренные равнины днепровского возраста; 8 – грядово-увалисто-холмистые краевые ледниковые образования днепровского возраста; 9 – останцы денудационных равнин палеоген-неогенового возраста; 10 – речные долины; 11 – озера; 12 – заболоченные поверхности; 13 – изогипсы [34]

**Fig. 5. Paleogeomorphological scheme of the Brest Polesye area (Muravian interglacial):**

1 – flat lacustrine-alluvial lowland of the Muravian age; 2 – gently undulating fluvioglacial lowland (plain)

of the Sozhian age; 3 – flat lacustrine-glacial lowland of the Sozhian age; 4 – wavy, gently undulating

and hummocky moraine plain of the Sozhian age; 5 – ridged hilly marginal glacial formations of the Sozhian age;

6 – gently undulating fluvioglacial lowland (plain) of the Dnieperian age; 7 – gently undulating moraine plain of the Dnieperian age; 8 – ridge and undulating hilly marginal glacial formations of the Dnieperian age;

9 – remains of denudation plains of Paleogene-Neogene age; 10 – river valleys;

11 – lakes; 12 – waterlogged surfaces; 13 – isohyps [34]

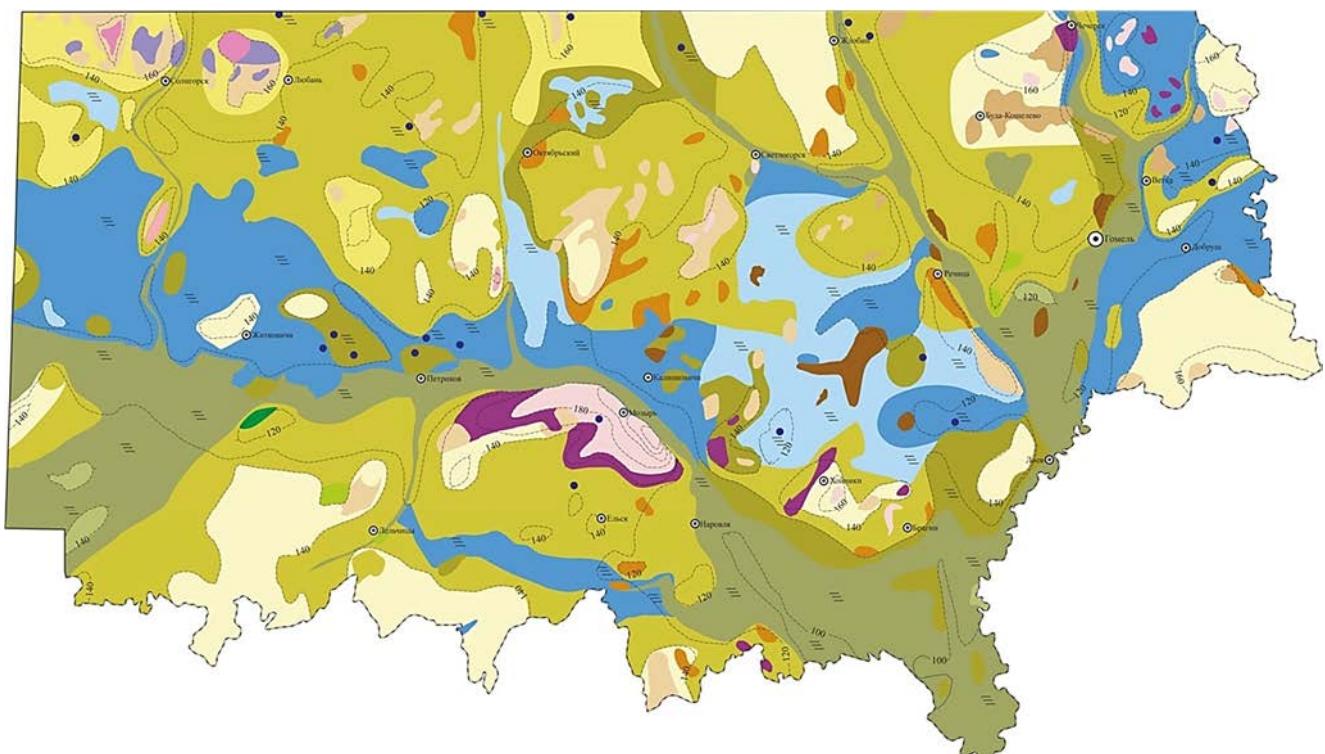
Выполненные палинологические исследования с учетом особенностей строения земной поверхности позволили построить схемы палеоландшафтов оптимума муравинского межледникования для территорий западной и восточной частей Белорусского Полесья в масштабе 1 : 500 000 (рис. 6), на которых отражены особенности распространения растительности в зависимости от приуроченности к определенным типам рельефа, характера подстилающих пород, глубины залегания грунтовых вод и др. Показано, что на изученной территории в то время получили распространение равнинные ландшафты умеренно-континентального широколиственно-лесного типа. В составе последнего в пределах западной части Полесья выделены 5 родов, 9 видов и 17 подвидов ландшафтов, существовавших во время самой теплой фазы климатического оптимума муравинского межледникования; в восточном Полесье разнообразие ландшафтов представлено 6 родами, 14 видами и 10 подвидами (Т. Б. Рылова, академик А. В. Матвеев, А. В. Шидловская) [37, 38].

Выявлены особенности таксономического состава и количественного содержания пыльцы в верхне-поозерских и голоценовых отложениях, проведен их сравнительный анализ с соответствующими данными по другим регионам Беларуси. На основании результатов палинологического и радиоуглеродного анализов уточнена региональная стратиграфическая схема позднеледниково-голоценовых отложений территории Белорусского Полесья и выделены основные этапы развития природы, начиная с поозерского плениглациала и до субатлантического периода голоцена включительно. Реконструированы основные климатические

параметры, прежде всего изменения температурного режима. Для западной части Полесья показаны значительные вариации зимних и летних температур от позднего дриаса ( $t_l = -17,0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{VII} = +17,2^{\circ}\text{C}$ ) до климатического оптимума голоцене ( $t_l = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{VII} = +19,5^{\circ}\text{C}$ ) и современного этапа ( $t_l = -5\ldots-6^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{VII} = +17\ldots+18^{\circ}\text{C}$ ). В восточном Полесье максимальные значения палеотемператур были отмечены во временном интервале от 8000 до 3200 кал. л. н. В оптимуме голоцене (8000–5500 кал. л. н.) средняя температура июля была равна  $t_{VII} = +18^{\circ}\text{C}$ , января –  $t_l = -1^{\circ}\text{C}$ , что ниже температурных данных, полученных для западной части Белорусского Полесья. Июльские температуры практически соответствовали современным значениям, а температура января была выше современной примерно на  $3,5^{\circ}\text{C}$  (В. П. Зерницкая) [39, 40].

Реконструированы палеоландшафты Белорусского Полесья для климатического оптимума ( $6000 \pm 100$  кал. л. н.; западная часть Полесья – 5 родов, 10 видов и 13 подвидов; восточная часть Полесья – 5 родов, 11 видов) и постоптимальной фазы ( $3000 \pm 100$  кал. л. н.; западная часть региона – 5 родов, 10 видов, 7 подвидов) голоцене. Выявлены пыльцевые индикаторы антропогенного влияния на растительный покров, на основании которых установлены четыре основных этапа воздействия человека на природные комплексы: поздний мезолит – ранний неолит ( $9,0\ldots7,0$  тыс. кал. л. н.) – охота, собирательство (появление вытоптанных мест); средний неолит ( $6,5\ldots5,5$  тыс. кал. л. н.) – зарождение примитивного земледелия; поздний неолит – бронзовый век ( $\sim 4,2\ldots3,0$  тыс. кал. л. н.) – скотоводство, земледелие; средневековые – современный этап (особенно последние 800 кал. л.) – скотоводство, пашенное земледелие (В. П. Зерницкая) [40].

Выполнено сравнение лесных ландшафтов, характерных для интервалов максимальной и постоптимальной фаз теплообеспеченности территории Белорусского Полесья в муравинском межледникование и голоцене, свидетельствующее о наличии заметных различий в характере лесной растительности и роли в ней термофильных видов, фитоценотическом разнообразии, соотношении западноевропейских и бореальных элементов и других особенностях. Изменения лесных сообществ находились в прямой зависимости от климата, прежде всего, от гидротермического режима, и свидетельствуют о более низких температурных параметрах климатического оптимума голоцене по сравнению с оптимумом муравинского межледникования (Т. Б. Рылова, В. П. Зерницкая, А. В. Шидловская).



**Рис. 6. Схема палеоландшафтов восточной части Белорусского Полесья в оптимуме муравинского межледникования [38]**

**Fig. 6. Paleolandscapes scheme of the eastern part of the Belarusian Polesie Area in the climatic optimum of the Muravian Interglacial [38]**

### Условные обозначения:

#### Legend:

##### **I. Грядово-холмистые и грядово-холмисто-увалистые лесные ландшафты на песчано-гравийных отложениях с прослойями супеси и суглинка**

##### **I. Ridged hilly and ridged and undulating hilly forest landscapes on sand and gravel deposits with interlayers of sandy loam and loam**

- I.1 грядово-холмистые ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод ниже 5 м, со смешанными сосново-дубовыми лесами с участием липы, граба, лещины, с редким подлеском из кустарников ridged hilly landscapes with a depth to the groundwater table more than 5 m, with mixed pine and oak forests and participation of lime, hornbeam, hazel, with a rare shrub undergrowth
- I.2 грядово-холмистые ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод выше 5 м, с дубравами грабовыми, с участием липы, лещины, клена, рябины, с подлеском из калины, бересклета, крушины и др. ridged hilly landscapes with a depth to the groundwater table less than 5 m, with the oak and hornbeam forests and with the participation of lime, hazel, maple, rowan, undergrowth of viburnum, euonymus, buckthorn, etc.
- I.3 грядово-холмисто-увалистые ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод ниже 5 м, с суходольными дубравами с участием лещины и дубравами грабовыми с участием лещины, липы, с подлеском из кустарников ridged and undulating hilly landscapes with a depth to the groundwater table more than 5 m, with the dry oak forests and participation of hazel and with the oak and hornbeam forests and participation of hazel, lime and shrub undergrowth
- I.3a грядово-холмисто-увалистые ландшафты с суходольными дубравами, с участием лещины и редкой примесью липы, клена, крушины, калины и др. ridged and undulating hilly landscapes with dry oak forests with the participation of hazel and a rare admixture of lime, maple, buckthorn, viburnum, etc.
- I.3б грядово-холмисто-увалистые ландшафты с дубравами грабовыми с участием лещины, липы, с подлеском из калины, крушины, бирючины и др. ridged and undulating hilly landscapes with hornbeam and oak forests with the participation of hazel, lime, undergrowth of viburnum, buckthorn, privet, etc.
- I.4 грядово-холмисто-увалистые ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод выше 5 м, с дубравами, с заметной примесью липы, клена, лещины, изредка граба, рябины, с подлеском из бересклета, крушины и др. ridged and undulating hilly landscapes with a depth to the groundwater table less than 5 m, with oak forests, with a noticeable admixture of lime, maple, hazel, rarely hornbeam, rowan, undergrowth of euonymus, buckthorn, etc.

##### **II. Пологоволнистые, местами мелкохолмистые и мелкоувалистые лесные ландшафты на моренных супесях и суглинках**

##### **II. Gently undulating, sometimes hummocky forest landscapes on moraine sandy loam and loam**

- II.1 пологоволнистые, мелкохолмистые и мелкоувалистые ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод ниже 2 м, с широколистенными, преимущественно липовыми лесами с примесью дуба, граба, вяза, клена и липово-дубовыми лесами со значительным участием граба, вяза, клена, лещины gently undulating, hummocky landscapes with a depth to the groundwater table more than 2 m, with broad-leaved, predominantly lime forests with an admixture of oak, hornbeam, elm, maple and lime and oak forests with significant participation of hornbeam, elm, maple, hazel
- II.1a пологоволнистые, мелкохолмистые и мелкоувалистые ландшафты с широколистенными лесами, преимущественно липовыми, с небольшой примесью дуба, граба, вяза, клена, лещины, с калиной, черемухой, крушиной в подлеске. gently undulating, hummocky landscapes with broad-leaved, predominantly lime forests, with an insignificant admixture of oak, hornbeam, elm, maple, hazel, and the undergrowth of viburnum, bird cherry, buckthorn
- II.1б пологоволнистые, мелкохолмистые и мелкоувалистые ландшафты с липово-дубовыми лесами со значительным участием граба, вяза, клена, ясения, лещины, ольхи, с подлеском из крушины, бересклета, калины и др. gently undulating, hummocky landscapes with lime and oak forests with significant participation of hornbeam, elm, maple, ash, hazel, alder, underbrush of buckthorn, euonymus, viburnum, etc.
- II.2 пологоволнистые, мелкохолмистые и мелкоувалистые ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод менее 2 м, с дубравами с примесью широколистенных пород и ольхи, с дубово-ясеневыми и дубово-черноольхово-ясеневыми лесами gently undulating, hummocky landscapes with a depth to the groundwater table less than 2 m, with oak forests with an admixture of broad-leaved species and alder, oak and ash, and oak, black alder and ash forests
- II.2.a пологоволнистые, иногда мелкохолмистые и мелкоувалистые ландшафты с дубравами, с участием широколистенных пород (ясения, клена, граба, липы, лещины, ольхи), с подлеском из крушины, бересклета и др. gently undulating, sometimes hummocky landscapes with oak forests, with the participation of broad-leaved species (ash, maple, hornbeam, lime, hazel, alder) with undergrowth of buckthorn, euonymus, etc.

- II.2.6** пологоволнистые сильно увлажненные ландшафты с дубово-ясеневыми и дубово-черноольхово-ясеневыми лесами, с примесью других широколистенных пород  
gently undulating heavily wetted landscapes with oak and ash, oak, black alder and ash forests with an admixture of other broad-leaved species

### **III. Пологоволнистые, изредка мелкохолмистые лесные ландшафты на флювиогляциальных разнозернистых песках**

#### **III. Gently undulating, sometimes hummocky forest landscapes on fluvioglacial variegated sands**

- III.1** пологоволнистые, изредка мелкохолмистые ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод ниже 2 м, с широколистенными лещиново-дубовыми лесами с примесью граба, вяза, клена, а также с хвойно-широколистенными сосново-дубовыми лесами с участием липы, граба, клена, вяза, лещины, ольхи  
gently undulating, sometimes hummocky landscapes with a depth to the groundwater table more than 2 m, with broad-leaved hazel and oak forests with an admixture of hornbeam, elm, maple, and mixed pine and oak forests with participation of lime, hornbeam, maple, elm, hazel, alder
- III.1a** пологоволнистые, изредка мелкохолмистые ландшафты с широколистенными лещиново-дубовыми лесами с участием липы, граба, вяза и клена, с кустарниками в подлеске  
gently undulating, sometimes hummocky landscapes with broad-leaved hazel and oak forests with lime, hornbeam, elm and maple, with shrubs undergrowth
- III.16** пологоволнистые, изредка мелкохолмистые ландшафты с хвойно-широколистенными сосново-дубовыми лесами, с участием граба, лещины, липы, вяза, клена и др.  
gently undulating, sometimes hummocky landscapes with mixed pine and oak forests with the participation of hornbeam, hazel, lime, elm, maple, etc.
- III.2** пологоволнистые, изредка мелкохолмистые ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод менее 2 м, с дубово-лещиновыми лесами с участием других лиственных пород, а также с черноольховыми фитоценозами и низинными болотами с залеганием грунтовых вод вблизи земной поверхности  
gently undulating, sometimes hummocky landscapes with a depth to the groundwater table less than 2 m, with oak and hazel forests with the participation of other deciduous species, and black alder phytocenoses and lowland bogs with the groundwater occurring near the earth's surface
- III.2a** пологоволнистые, изредка мелкохолмистые ландшафты с дубово-лещиновыми лесами, с примесью других лиственных пород (граба, ясения, клена, вяза, рябины и др.)  
gently undulating, sometimes hummocky landscapes with oak and hazel forests, with an admixture of other deciduous species (hornbeam, ash, maple, elm, rowan, etc.)
- III.26** пологоволнистые ландшафты с глубиной залегания грунтовых вод вблизи земной поверхности (менее 1 м), с черноольховыми фитоценозами и низинными болотами  
gently undulating landscapes with the groundwater occurring near the earth's surface (less than 1 m), with black alder phytocenoses and lowland bogs

### **IV. Плоские лесные ландшафты на озерно-ледниковых суглинках и глинах**

#### **IV. Flat forest landscapes on the lacustrine-glacial loams and clays**

- IV.1** плоские ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод менее 2 м, с дубово-ясеневыми лесами с примесью клена, липы, ольхи, осины, с подлеском из бузины, крушиньи, калины и др.  
flat landscapes with a depth to the groundwater table less than 2 m, with oak and ash forests with an admixture of maple, lime, alder, aspen, with undergrowth of elder, buckthorn, viburnum, etc.
- IV.2** плоские ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод до 1 м, с широколистенно-черноольховыми (дубово-ясенево-черноольховыми) лесами, с подлеском из крушиньи, калины и других кустарников, а также с верховыми и переходными болотами  
flat forest landscapes with a depth to the groundwater table less than 1 m, with broad-leaved and black alder (oak, ash and black alder) forests, with undergrowth of buckthorn, viburnum and other shrubs, and upland and transitional bogs

### **V. Плоские и пологоволнистые лесные ландшафты на озерно-аллювиальных песках и супесях**

#### **V. Flat and gently undulating forest landscapes on the lacustrine-alluvial sands and sandy loams**

- V.1** плоские и пологоволнистые ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод более 1 м, с дубовыми лесами с примесью ясения, вяза, лещины, осины, ольхи, с подлеском из крушиньи, бересклета и др.  
flat and gently undulating landscapes with a depth to the groundwater table more than 1 m, with oak forests with an admixture of ash, elm, hazel, aspen, alder, with undergrowth of buckthorn, euonymus, etc.
- V.2** плоские и пологоволнистые ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод менее 1 м, с ясенево-черноольховыми лесами с участием осины, ивы, с подлеском из кустарников, местами с низинными травянистыми болотами  
flat and gently undulating landscapes with a depth to the groundwater table less than 1 m, with ash and black alder forests with the participation of aspen, willow, and undergrowth of shrubs, sometimes with lowland grassy bogs

## VI. Плоские лесные ландшафты на аллювиальных песках и супесях

### VI. Flat forest landscapes on the alluvial sands and sandy loams

- VI.1 плоские пойменные ландшафты с глубинами залегания грунтовых вод более 1 м, с дубравами ольхово-пойменными, с подлеском из бересклета, крушины и других кустарниковых пород  
flat floodplain landscapes with a depth to the groundwater table more than 1 m, with alder and floodplain oak forests, with undergrowth of euonymus, buckthorn and other shrubs
- VI.2 плоские пойменные ландшафты с залеганием грунтовых вод вблизи земной поверхности, с черноольховыми лесами, местами разнотравно-осоковыми лугами и низинными болотами  
flat floodplain landscapes with the groundwater occurring near the earth's surface, with black alder forests, sometimes forb-sedge meadows and lowland bogs

#### Прочие обозначения

#### Other designations



котловины озер  
lake basins



Гомель

современные населенные пункты  
modern settlements



заболоченность  
waterlogging



изогипсы  
isohyps

Важные результаты по проблемам стратиграфии и палеогеографии квартера Восточной Европы были получены академиком А. К. Карабановым и Т. Б. Рыловой при выполнении научно-исследовательских работ в составе международного белорусско-польского коллектива. Так, для территории Берёзовского, Кобринского и Малоритского районов Брестской области получены новые данные о геологическом строении четвертичных отложений, уточняющие границу распространения припятского оледенения в граничных районах Беларуси и Польши, а также историю развития растительности позднеберезинского, Александрийского и раннеприпятского времени в указанном регионе. Составлен комплект геологических карт приграничной территории Польши и Беларуси в масштабе 1 : 250 000 (районы городов Бяла-Подляска, Брест, Сокулка, Гродно) [41, 42].

Сотрудниками лаборатории в 2021 г. были закончены исследования четвертичных отложений трансграничной белорусско-литовской территории, проводившиеся совместно с зарубежными коллегами. В результате были обобщены и проанализированы материалы изучения 15 наиболее представительных (опорных) разрезов верхнего плейстоцена (муравинско-нижнепоозерская/мяркинская-нижненямунаская часть) палинологическим и диатомовым методами. Выполнено палиностратиграфическое расчленение отложений изученных разрезов верхнего плейстоцена территории Беларуси и Литвы на локальные пыльцевые зоны, которые сопоставлены с региональными пыльцевыми зонами. Впервые разработана палиностратиграфическая схема муравинско-нижнепоозерских отложений для территории северо-западной Беларуси на основании выявленных региональных особенностей таксономического состава палиnofлоры и количественного содержания ее компонентов в составе спектров пыльцевых зон изученных опорных разрезов и их сравнения с таковыми по другим регионам страны. Выполнена реконструкция палеотемпературных параметров для последовательных фаз развития растительности на протяжении муравинского/мяркинского и раннепоозерского/ранненямунаского времени позднего плейстоцена в трансграничном регионе Беларуси и Литвы. Выполненная реконструкция показала, что диапазоны летних и зимних температур на территории исследований были очень близки. В самые теплые фазы климатического оптимума муравинского/мяркинского межледниковаля Июльские и Январские палеотемпературы находились в одинаковом диапазоне:  $t_{VII} = +18\ldots+23^{\circ}\text{C}$  (средняя  $+20,5^{\circ}\text{C}$ , что на  $2,5^{\circ}\text{C}$  выше современной в белорусской части исследуемого региона);  $t = -4\ldots+4^{\circ}\text{C}$  (средняя  $0^{\circ}\text{C}$ , на  $4^{\circ}\text{C}$  выше современной в северо-западной части Беларуси). Впервые на основе выполненного детального анализа и сопоставления всех геологических, палинологических и диатомологических данных по верхнему/позднему плейстоцену для территории региона исследований разработана схема межрегиональной геологической и климатостратиграфической корреляции верхнеплейстоценовых (межледниково-нижнеледниковая часть) отложений приграничной территории Беларуси и Литвы (Т. Б. Рылова, академик А. К. Карабанов, С. В. Демидова, А. В. Шидловская) [43–45].

Изучение процесса трансформации полесских ландшафтов, выполненное В. П. Зерницкой совместно с российскими коллегами, позволило разработать концепцию распознавания экологических условий развития данных ландшафтов на основе литологических, геохимических, изотопных и палинолог-

гических данных. Это позволило выделить этапы антропогенного влияния на природные комплексы. Установлено, что деятельность человека, начатая в бронзовом веке (~2800 кал. л. н.) и усилившаяся в течение XVII–XX вв., привела к уничтожению широколиственных лесов и сокращению лесопокрытых площадей в отдельных районах Полесья до 20–30 %. Выяснено, что наиболее чувствительными к климатическим изменениям являются ландшафты, приуроченные к моренным возвышенностям и флювиогляциальным равнинам. Построен комплект пыльцевых карт древесных пород (сосна, ель, береза, ольха, орешник, дуб, вяз, липа, граб, бук) по временным срезам позднеледниковой и голоценовой, иллюстрирующих динамику растительного покрова за последние 14 тыс. кал. л. Выполнена хронологическая корреляция палеогеографических событий в пределах восточной части Белорусского Полесья и Мещерской низменности (Центральный федеральный округ России). Выделены надрегиональные, региональные и локальные особенности развития этих территорий в голоцене. Выполнены палеоклиматические реконструкции и сформулирован прогнозный сценарий развития полесских ландшафтов в условиях изменяющегося климата [46, 47].

Подобные описанным выше работы были выполнены для территорий Белорусского и Литовского Поозерья. Так, по материалам изучения 70 разрезов спорово-пыльцевым и геохимическими методами выполнена переинтерпретация фактического материала, позволившая разработать хроностратиграфическую схему расчленения позднеледниково-голоценовых отложений изученного трансграничного региона. На основе выполненной палинологической и хронологической корреляции проведена реконструкция природных обстановок в течение позднеледниковой и голоценовой в приграничном белорусско-литовском регионе, выделены общие и региональные особенности динамики растительного покрова. Установлено, что проникновение ели на территорию Литвы в течение позднеледниковой происходило с территории Белорусского Поозерья. В течение голоцена увеличение роли ели в лесах совпадало с этапами похолодания и (или) повышения влажности климата. Реконструирована послепедниковая эволюция осадконакопления в четырех хронологических интервалах: ~16,4–11,7 тыс. кал. л. н. – верхнепоозерские отложения; 11,7–9,0 тыс. кал. л. н. – нижнеголоценовые; 9,0–5,5 тыс. кал. л. н. – среднеголоценовые; 5,5 тыс. кал. л. н. – настоящее время – верхнеголоценовые отложения. В позднеледниковые происходила аккумуляция эоловых, солифлюкционных, делювиальных, аллювиальных и лимнических отложений. В течение голоцена началось накопление биогенных (торфяных) отложений, в озерах – смешанных хемогенно-биогенных и биогенных отложений, в речных долинах – аллювиальных осадков, а в течение последних 2,7 тыс. кал. л. под влиянием хозяйственной деятельности человека активизировались склоновые и эоловые процессы, обусловившие накопление делювиальных и эоловых отложений [40, 48].

Полученные В. П. Зерницкой результаты изучения палинологическим и геохимическими методами позднеледниковых и голоценовых отложений Беларуси и прилегающих регионов Восточно-Европейской платформы легли в основу фундаментальной монографии «Позднеледниковые и голоцен Беларуси: геохронология, осадконакопление, растительность и климат» [40]. С учетом полученных новых данных детализирована стратиграфическая схема позднеледниковой и голоцена Беларуси (рис. 7).

Слои нарочанского подгоризонта поозерского горизонта (позднеледниковые) коррелируют с отдельными слоями, сформированными в течение Гренландского интерстадиала и стадиального похолодания; рубеж между плейстоценом и голоценом в белорусских разрезах датирован 11 700–11 500 кал. л. н. Судобльский горизонт, сформированный отложениями незавершенного межледниковой,несен к нижнему подотделу голоцена и представлен слоями, накопившимися в пре boreальном (PB), boreальном (BO), атлантическом (AT), суб boreальном (SB) и субатлантическом (SA) периодах. Подразделение голоцена (в соответствии с Международной стратиграфической шкалой) на три яруса (границы около 8,2 и 4,2 тыс. кал. л. н.) в отложениях судобльского горизонта маркируется пыльцевыми и изотопно-кислородными данными, фиксирующими похолодание климата. Реконструирована динамика развития растительности за последние 16 тыс. кал. л., определены пространственно-временная специфика процесса осадконакопления и метахронность в расселении древесных пород.

В настоящее время в лаборатории современной геодинамики и палеогеографии в рамках Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы проводится изучение процесса эволюции ландшафтов территории Центральной Беларуси в муравинское межледниковые и в позднеледниковые-голоцене. Собраны и проанализированы опубликованные и фондовые палинологические данные по муравинским и позднеледниково-голоценовым отложениям исследуемого региона. Выявлены региональные особенности флористического состава и количественного участия его важнейших компонентов в составе спектров соответствующих пыльцевых зон. Выполнено сравнение пыльцевых зон с данными по другим регионам Беларуси, что позволило выявить региональные особенности развития растительности на территории исследований на протяжении муравинского межледниковой и голоцена. Выполнена реконструкция палеотемпературных параметров муравинского межледниковой на территории западной, центральной и восточной частей региона; построена схема динамики температур для западной, центральной и восточной частей Центральной Беларуси на протяжении муравинского межледниковой и позднеледниково-голоценового времени.

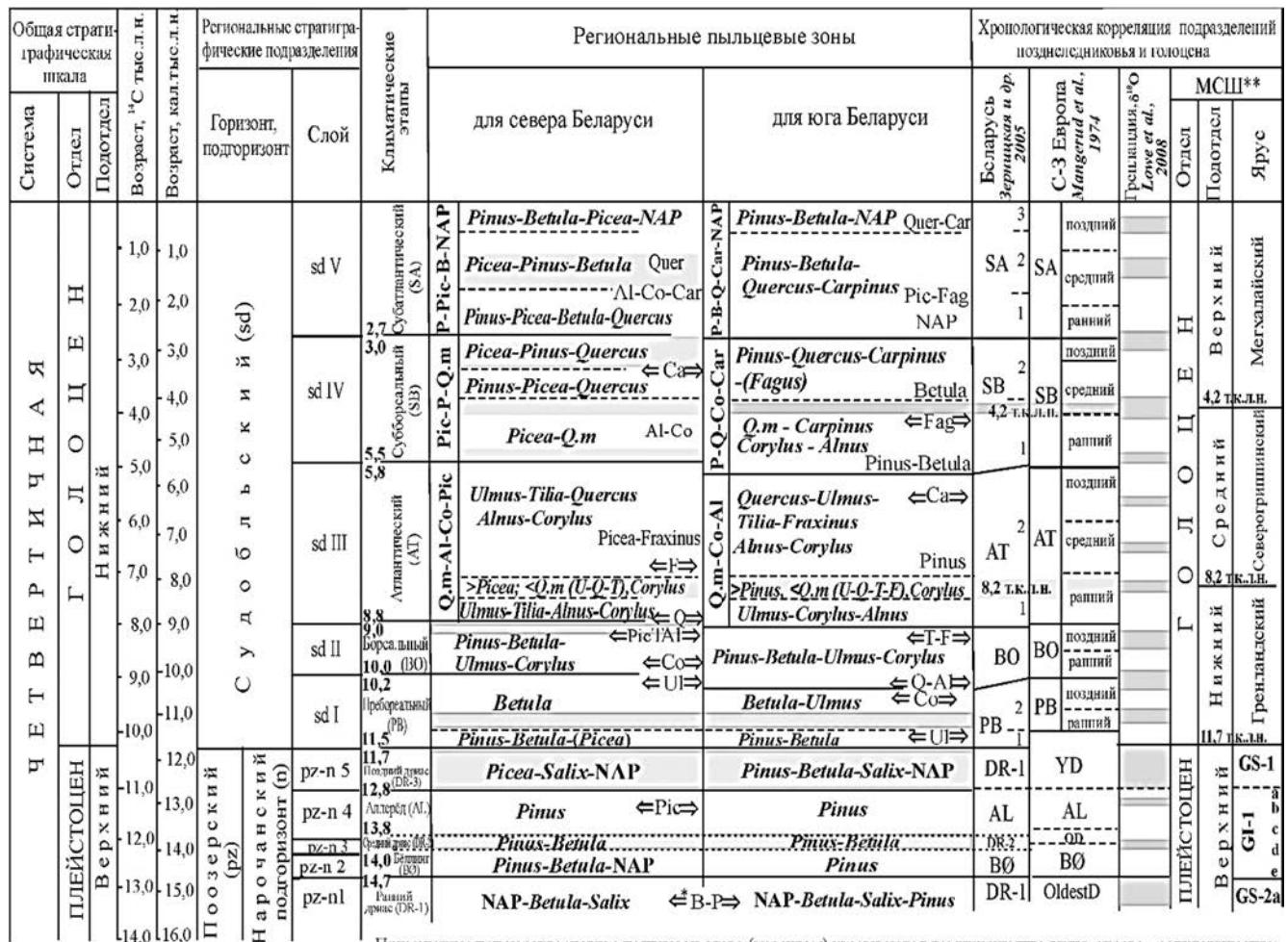


Рис. 7. Схема стратиграфического расчленения позднеледниковых и голоценовых отложений Беларуси [40]

**Fig. 7. Scheme of stratigraphic subdivision of Late Glacial and Holocene deposits of Belarus [40].**

**Заключение.** Со времени образования лаборатории современной геодинамики и палеогеографии в Институте природопользования НАН Беларуси ее сотрудниками выполнен комплекс фундаментальных и прикладных исследований: 1) изучены проявления современных геологических процессов на территории Беларуси в региональном масштабе, выявлены неблагоприятные последствия современной геодинамики, проведена оценка степени благоприятности геологической среды для жизнедеятельности населения; 2) выполнено палинологическое изучение отложений муравинского межледникового и позднеледниковья-голоцен, реконструированы палеорельеф и палеоландшафты оптимальных фаз названных временных интервалов квартера, разработаны и утверждены соответствующие хроностратиграфические схемы; 3) выполнена межрегиональная хроностратиграфическая и палеоклиматическая корреляция палеогеографических событий плейстоцена и позднеледниковья-голоцена со смежными с Беларусью регионами Украины, России, Литвы и Польши; 4) выполнено обоснование нижней границы квартера на уровне 2,58 млн лет. В настоящее время в лаборатории современной геодинамики и палеогеографии выполняются работы по изучению эволюции природных обстановок в позднем плейстоцене и голоцене и особенностей проявления современных геологических процессов на территории центрального белорусского региона в рамках Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы.

**Список использованных источников**

1. Матвеев, А. В. Геоактивные зоны на территории Беларуси / А. В. Матвеев // Літасфера. – 2015. – № 1 (42). – С. 64–70.
2. Матвеев, А. В. Активизация разрывных нарушений на территории Беларуси в четвертичное время / А. В. Матвеев // Літасфера. – 2014. – № 1 (40). – С. 43–49.
3. Матвеев, А. В. Влияние геоактивных зон на геэкологическую обстановку / А. В. Матвеев // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. – 2015. – № 1. – С. 82–91.
4. Матвеев, А. В. Последствия проявления опасных геологических процессов на территории Беларуси / А. В. Матвеев, Л. А. Нечипоренко // Природопользование. – 2016. – Вып. 29. – С. 30–37.
5. Матвеев, А. В. Классификация природных и природно-антропогенных опасностей литосферного класса на территории Беларуси / А. В. Матвеев // Літасфера. – 2017. – № 1 (46). – С. 98–106.
6. Матвеев, А. В. Районирование территории Беларуси по возможным последствиям проявления природных и природно-антропогенных опасностей литосферного класса / А. В. Матвеев // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 329–334. doi:10.29235/1561-8323-2018-62-3-329-334
7. Матвеев, А. В. Опасные эндогенные процессы на территории Беларуси / А. В. Матвеев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы запада Восточно-Европейской платформы: проблемы изучения и рационального использования : материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 215-летию со дня рожд. И. Домейко, Минск, 31 июля – 3 августа 2017 г. / редкол.: А. К. Карабанов [и др.]. – Минск : СтройМедиаПроект, 2017. – С. 188–191.
8. Матвеев, А. В. Природные и природно-антропогенные опасности экзогенного типа на территории Беларуси / А. В. Матвеев // Актуальные проблемы наук о Земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году науки в Республике Беларусь, Брест, 25–27 сент. 2017 г. : в 2 ч. – Брест : БрГУ, 2017. – Ч. 1. – С. 12–15.
9. Матвеев, А. В. Геохимия четвертичных отложений Беларуси / А. В. Матвеев, В. Е. Бордон. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 191 с.
10. Матвеев, А. В. Радон в геологических комплексах Беларуси / А. В. Матвеев, А. К. Карабанов, М. И. Автушко. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 136 с.
11. Матвеев, А. В. Радонопродуцирующий потенциал флювиогляциальных отложений Беларуси / А. В. Матвеев, М. И. Автушко, Л. А. Нечипоренко // Природопользование. – 2015. – Вып. 27. – С. 54–60.
12. Матвеев, А. В. Радоновые аномалии в почвенном воздухе на территории Беларуси / А. В. Матвеев // Літасфера. – 2016. – № 1 (44). – С. 81–88.
13. Матвеев, А. В. Районирование территории Беларуси по степени радоновой опасности грунтов / А. В. Матвеев // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2016. – Т. 60, № 5. – С. 108–112.
14. Матвеев, А. В. Радонопродуцирующий потенциал пород кристаллического фундамента территории Беларуси / А. В. Матвеев, М. И. Автушко // Природопользование. – 2016. – Вып. 29. – С. 14–20.
15. Исследования по проблеме радона в Беларуси и других странах Европы / О. И. Ярошевич [и др.] // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2013. – № 4. – С. 101–117.
16. Автушко, М. И. Новые данные о поступлении радона в среду обитания человека / М. И. Автушко, А. В. Матвеев, С. А. Исаченко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 3. – С. 355–360. doi:10.29235/1561-8323-2021-65-3-355-360
17. Матвеев, А. В. О влиянии атмосферных осадков и лунно-солнечного гравитационного воздействия на концентрацию радона в поровом воздухе дисперсных грунтов / А. В. Матвеев, М. И. Автушко, С. А. Исаченко // Дакл. Нац. акад. навук Беларусі. – 2022. – Т. 66, № 2. – С. 223–228. doi:10.29235/1561-8323-2022-66-2-223-228
18. Кухарик, Е. А. Особенности техногенных геологических процессов и создаваемого ими рельефа на территории западной части Белорусского Полесья / Е. А. Кухарик // Літасфера. – 2019. – № 1 (50). – С. 160–169.
19. Матвеев, А. В. Геологические критерии оценки качества среды для обитания населения на территории западной части Белорусского Полесья / А. В. Матвеев, В. П. Зерницкая // Веснік Бресцкага ўніверсітэта. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. – 2019. – № 1. – С. 92–98.
20. Матвеев, А. В. Современные геологические процессы на территории восточной части Белорусского Полесья / А. В. Матвеев // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 2. – С. 217–224. doi:10.29235/1561-8323-2020-64-2-217-224
21. Матвеев, А. В. Влияние процессов современной геодинамики на степень комфорtnости геологической среды для населения на территории восточной части Белорусского Полесья / А. В. Матвеев, В. П. Зерницкая // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. – 2020. – № 1. – С. 94–104.
22. Матвеев, А. В. Современная геодинамика территории юго-западной Беларуси / А. В. Матвеев, Е. А. Кухарик // Літасфера. – 2019. – № 2 (51). – С. 36–44.
23. Кухарик, Е. А. Районирование территории юго-западной Беларуси по особенностям проявления современной геодинамики и благоприятности геологической среды для населения / Е. А. Кухарик // Літасфера. – 2020. – № 2 (53). – С. 21–28.
24. Матвеев, А. В. Современные геологические процессы на территории Белорусского Поозерья / А. В. Матвеев, В. П. Зерницкая // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 163–170.
25. Позднеледниковая и голоценовая история развития Освейского водно-болотного комплекса на севере Беларуси / В. П. Зерницкая [и др.] // Літасфера. – 2019. – № 1 (50). – С. 26–41.

26. Стратиграфические схемы докембрийских и фанерозойских отложений Беларуси : объяснительная записка / С. А. Кручек [и др.] ; редкол.: С. А. Кручек [и др.]. – Минск : БелНИГРИ, 2010. – 282 с.
27. Изменения в стратиграфических схемах неогеновых и четвертичных отложений Беларуси в связи с пересмотром границы между системами / А. В. Матвеев [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 350–359. doi:10.29235/1561-8323-2019-63-3-350-359
28. Пограничные горизонты неогеновой и четвертичной систем Беларуси (на границе 2,58 млн лет) / А. В. Матвеев [и др.] // Літасфера. – 2019. – № 1 (50). – С. 15–25.
29. Рылова, Т. Б. Александрийское межледникование Беларуси по данным палинологических исследований / Т. Б. Рылова, И. Е. Савченко // Літасфера. – 2011. – № 1 (34). – С. 54–68.
30. Карабанов, А. К. Проблемы стратиграфического расчленения плейстоцена Беларуси / А. К. Карабанов, Т. Б. Рылова, С. В. Демидова // Квартер во всем его многообразии. Фундаментальные проблемы, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований : материалы VII Всерос. совещания по изучению четвертичного периода, Апатиты, 12–17 сент. 2011 г. : в 2 т. / отв. ред.: О. П. Корсакова, В. В. Колька. – Апатиты ; СПб : [б. и.], 2011. – Т. 1 : А–К. – С. 255–258.
31. Рылова, Т. Б. Растительность и климат территории западной части Белорусского Полесья в муравинское межледникование / Т. Б. Рылова, И. Е. Савченко // Літасфера. – 2018. – № 2 (49). – С. 17–33.
32. Рылова, Т. Б. Растительность и климат территории восточной части Белорусского Полесья в муравинское межледникование / Т. Б. Рылова // Літасфера. – 2020. – № 1 (52). – С. 89–104.
33. Рылова, Т. Б. Новые палинологические исследования плейстоценовых отложений, вскрытых скважиной у д. Первомайск Солигорского района Минской области / Т. Б. Рылова, А. В. Шидловская // Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов : сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф., приуроч. к 1000-летию г. Бреста, Брест, 12–14 сент. 2019 г. : в 2 ч. / редкол.: А. К. Карабанов, М. А. Богдасаров, А. А. Волчек. – Брест : БрГУ, 2019. – Ч. 1. – С. 178–182.
34. Матвеев, А. В. Палеогеоморфологическая схема территории западной части Белорусского Полесья (муравинское межледникование) / А. В. Матвеев, В. П. Зерницкая // Літасфера. – 2018. – № 1 (48). – С. 4–11.
35. Матвеев, А. В. Особенности строения земной поверхности Белорусского Полесья в муравинское межледникование / А. В. Матвеев // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 138–147.
36. Матвеев, А. В. Геологическое строение земной поверхности территории Белорусского Полесья в муравинское межледникование / А. В. Матвеев // Літасфера. – 2021. – № 2 (55). – С. 63–69.
37. Матвеев, А. В. Ландшафты западной части Белорусского Полесья в климатическом оптимуме муравинского межледникования / А. В. Матвеев, Т. Б. Рылова // Природопользование. – 2018. – № 2. – С. 83–94.
38. Рылова, Т. Б. Ландшафты восточной части Белорусского Полесья в климатическом оптимуме муравинского межледникования / Т. Б. Рылова, А. В. Матвеев, А. В. Шидловская // Природопользование. – 2020. – № 2. – С. 64–76.
39. Изменения окружающей среды в позднеледникование и голоцене на юго-востоке Беларуси / В. П. Зерницкая [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 5. – С. 584–596. doi:10.29235/1561-8323-2019-63-5-584-596
40. Зерницкая, В. П. Позднеледникование и голоцен Беларуси: геохронология, осадконакопление, растительность и климат / В. П. Зерницкая ; под ред. А. В. Матвеева. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 303 с.
41. Mapa geologiczna południowej części obszaru przygranicznego Polski i Białorusi (rejon Białej Podlaskiej i Brestu 1 : 250 000) : tekst objaśniający / T. Krzywicki [i in.]; redaktorzy naukowi : L. Marks, A. K. Karabanow. – Warszawa : Państwowy Instytut Geologiczny ; Państwowy Instytut Badawczy, 2017. – 129 p.
42. Revised limit of the Saalian ice sheet in central Europe / L. Marks [et al.] // Quaternary International. – 2018. – Vol. 478. – P. 59–74. doi:10.1016/j.quaint.2016.07.043
43. Рылова, Т. Б. Стратиграфия муравинских отложений территории северо-западной Беларуси и палеогеографические реконструкции по палеоботаническим данным / Т. Б. Рылова, С. В. Демидова, А. В. Шидловская // Літасфера. – 2020. – № 2 (53). – С. 50–68.
44. Муравинское/мяркинское межледникование на приграничной территории Беларуси и Литвы / Т. Б. Рылова [и др.] // Літасфера. – 2021. – № 1 (54). – С. 36–57.
45. Correlation of Eemian sections in Lithuania and Belarus based on palaeomagnetic, radioisotope and palaeobotanic data / V. Šeirienė [et al.] // Geological Quarterly. – 2021. – Vol. 65, № 3. – P. 1–10. doi:10.7306/gq.1615
46. Зерницкая, В. П. Реконструкция климата Беларуси в позднеледникование и голоцене / В. П. Зерницкая, Е. Ю. Новенко // Наука и инновации. – 2016. – № 9 (163). – С. 21–24.
47. Новенко, Е. Ю. Реентные спорово-пыльцевые спектры заповедных территорий европейской части России как ключ к интерпретации результатов палеоэкологических исследований / Е. Ю. Новенко, Н. Г. Мазей, В. П. Зерницкая // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – 2017. – Т. 2, № 2. – С. 55–65. doi:10.24189/ncr.2017.012
48. Postglacial palaeoenvironmental investigations in neighbouring countries: common questions and joint solutions / M. Stančikaitė [et al.] // Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов : сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф., приуроч. к 1000-летию г. Бреста, Брест, 12–14 сент. 2019 г. : в 2 ч. / редкол.: А. К. Карабанов, М. А. Богдасаров, А. А. Волчек. – Брест : БрГУ, 2019. – Ч. 1. – С. 24–25.

### References

1. Matveev A. V. *Geoaktivnye zony na territorii Belarusi* [Geoactive zones in the territory of Belarus]. *Litasfera = Lithosphere*, 2015, no. 1 (42), pp. 64–70. (in Russian)
2. Matveev A. V. *Aktivizatsiya razryvnykh narushenii na territorii Belarusi v chetvertichnoe vremya* [Activization of fracture disturbances in territory of Belarus in Quaternary period]. *Litasfera = Lithosphere*, 2014, no. 1 (40), pp. 43–49. (in Russian)
3. Matveev A. V. *Vliyanie geoaktivnykh zon na geoekologicheskuyu obstanovku* [Influence of geoactive zones on the geoecological situation]. *Vesnik Brestskaga universiteta. Ser. 5, Khimiya. Biyalogiya. Navuki ab Zyamli = Vesnik of Brest University. Series 5. Chemistry. Biology. Sciences about Earth*, 2015, no. 1, pp. 82–91. (in Russian)
4. Matveev A. V., Nechiporenko L. A. *Posledstviya proyavleniya opasnykh geologicheskikh protsessov na territorii Belarusi* [Dangerous consequences of geological processes manifestation on the territory of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2016, vol. 29, pp. 30–37. (in Russian)
5. Matveev A. V. *Klassifikatsiya prirodnnykh i prirodno-antropogenykh opasnostei litosfernogo klassa na territorii Belarusi* [Classification of nature and nature-anthropogenic dangers of the lithospheric class on the territory of Belarus]. *Litasfera = Lithosphere*, 2017, no. 1 (46), pp. 98–106. (in Russian)
6. Matveev A. V. *Raionirovanie territorii Belarusi po vozmozhnym posledstviyam proyavleniya prirodnnykh i prirodno-antropogenykh opasnostei litosfernogo klassa* [Zoning of the territory of Belarus through possible consequences of manifestation of nature and nature-anthropogenic hazards of lithosphere class]. *Doklady Natsional'nai akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 329–334. (in Russian). doi:10.29235/1561-8323-2018-62-3-329-334
7. Matveev A. V. *Opasnye endogennye protsessy na territorii Belarusi* [Dangerous endogenous processes on the territory of Belarus]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy zapada Vostochno-Evropeiskoi platformy: problemy izucheniya i rassional'nogo ispol'zovaniya : materialy Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. 215-letiyu so dnya rozhd. I. Domeiko*, Minsk, 31 iyulya – 3 avgusta 2017 g. [Proc. Int. Sci. Conf. dedicated to the 215 anniversary from the day of I. Domeiko "Geology and Mineral Raw Materials of the West of Eastern European Platform: Problems of Rational Nature Management Study"]. Minsk, 2017, pp. 188–191. (in Russian)
8. Matveev A. V. *Prirodnye i prirodno-antropogennye opasnosti ekzogenного tipa na territorii Belarusi* [Natural and natural-anthropogenic dangers of exogenous type on the territory of Belarus]. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle: ispol'zovanie prirodnnykh resursov i sokhranenie okruzhayushchei sredy : sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. Godu nauki v Respublike Belarus'*, Brest, 25–27 sent. 2017 g. Ch. 1 = [Proc. of the Int. Sci. and Practical Conf. dedicated to the Year of Science in the Republic of Belarus "Actual problems of the Earth sciences: the use of natural resources and the preservation of the environment"]. Brest, part. 1, pp. 12–15. (in Russian)
9. Matveev A. V., Bordon V. E. *Geokhimiya chetvertichnykh otlozhenii Belarusi* [Geochemistry of Quaternary deposits of Belarus]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013, 191 p. (in Russian)
10. Matveev A. V., Karabanova A. K., Avtushko M. I. *Radon v geologicheskikh kompleksakh Belarusi* [Radon in the geological complexes of Belarus]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, 136 p. (in Russian)
11. Matveev A. V., Avtushko M. I., Nechiporenko L. A. *Radonoproducitsiruyushchii potentsial flyuvioglyatsial'nykh otlozhenii Belarusi* [Radon-produced potential of fluvioglacial deposits of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2015, vol. 27, pp. 54–60. (in Russian)
12. Matveev A. V. *Radonovye anomalii v pochvennom vozdukhe na territorii Belarusi* [Radon anomalies in the soil air on the territory of Belarus]. *Litasfera = Lithosphere*, 2016, no. 1 (44), pp. 81–88. (in Russian)
13. Matveev A. V. *Raionirovanie territorii Belarusi po stepeni radonovoи opasnosti gruntov* [Division of the territory of Belarus into the regions with different radon contamination hazard levels of soils]. *Doklady Natsional'nai akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2016, vol. 60, no. 5, pp. 108–112. (in Russian)
14. Matveev A. V., Avtushko M. I. *Radonoproducitsiruyushchii potentsial porod kristallicheskogo fundamenta territorii Belarusi* [Radon produced potential of crystalline basement rocks of the territory of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2016, vol. 29, pp. 14–20. (in Russian)
15. Yaroshevich O. I., Karabanova A. K., Konopel'ko M. V., Matveev A. V., Zhuk I. V., Vasilevskii L. L., Lukashevich Zh. A. *Issledovaniya po probleme radona v Belarusi i drugikh stranakh Evropy* [Studies on the radon problem in Belarus and other countries of Europe]. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovanii = Vestnik of the Foundation for fundamental research*, 2013, no. 4, pp. 101–117. (in Russian)
16. Avtushko M. I., Matveev A. V., Isachenko S. A. *Novye dannye o postuplenii radona v sredu obitaniya cheloveka* [Recent data on radon entry into the human environment]. *Doklady Natsional'nai akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 3, pp. 355–360. (in Russian). doi:10.29235/1561-8323-2021-65-3-355-360
17. Matveev A. V., Avtushko M. I., Isachenko S. A. *O vliyanii atmosfernykh osadkov i lunno-solnechnogo gravitatsionnogo vozdeistviya na konsentratsiyu radona v porovom vozdukhe dispersnykh gruntov* [Influence of atmospheric precipitation and lunisolar gravitational forces on radon concentrations in the air in the dispersive soil pores]. *Doklady Natsional'nai akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 2, pp. 223–228. (in Russian). doi:10.29235/1561-8323-2022-66-2-223-228
18. Kukharik E. A. *Osobennosti tekhnogenykh geologicheskikh protsessov i sozdavaemogo imi rel'efa na territorii zapadnoi chasti Belorusskogo Poles'ya* [Features of the technogenic geological processes and the relief created by them on the territory of the western part of the Belarusian Polesie]. *Litasfera = Lithosphere*, 2019, no. 1 (50), pp. 160–169. (in Russian)
19. Matveev A. V., Zernitskaya V. P. *Geologicheskie kriterii otsenki kachestva sredy dlya obitaniya naseleniya na territorii zapadnoi chasti Belorusskogo Poles'ya* [Geological criteria of the environmental qualitative assessment for the population living in the territory of the western part of Belarus Polesia]. *Vesnik Brestskaga universiteta. Ser. 5, Khimiya. Biyalogiya. Navuki ab Zyamli = Vesnik of Brest University. Series 5. Chemistry. Biology. Sciences about Earth*, 2019, no. 1, pp. 92–98. (in Russian)

20. Matveev A. V. Sovremennye geologicheskie protsessy na territorii vostochnoi chasti Belorusskogo Poles'ya [Recent geological processes within the eastern part of the Belarusian Polesye area]. *Doklady Natsional'nai akademii navuk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 2, pp. 217–224. (in Russian). doi:10.29235/1561-8323-2020-64-2-217-224
21. Matveev A. V., Zernitskaya V. P. Vliyanie protsessov sovremennoi geodinamiki na stepen' komfortnosti geologicheskoi sredy dlya naseleniya na territorii vostochnoi chasti Belorusskogo Poles'ya [Effect of the recent geodynamic processes on the degree of comfort conditions for the population living in the geological environment of the eastern part of the Belarusian Polesye area]. *Vesnik Brestskogo universiteta. Seryya 5. Khimiya. Biologiya. Navuki ab Zyamli = Vesnik of Brest University. Ser. 5, Chemistry. Biology. Sciences about Earth*, 2020, no. 1, pp. 94–104. (in Russian)
22. Matveev A. V., Kukharik E. A. Sovremennaya geodinamika territorii yugo-zapadnoi Belarusi [Modern geodynamics of the southwestern Belarus]. *Litasfera = Lithosphere*, 2019, no. 2 (51), pp. 36–44. (in Russian)
23. Kukharik E. A. Raionirovanie territorii yugo-zapadnoi Belarusi po osobennostyam proyavleniya sovremennoi geodinamiki i blagopriyatnosti geologicheskoi sredy dlya naseleniya [Zoning of the southwestern Belarus territory according to the features of modern geodynamics and favorability of the geological environment for population]. *Litasfera = Lithosphere*, 2020, no. 2 (53), pp. 21–28. (in Russian)
24. Matveev A. V., Zernitskaya V. P. Sovremennye geologicheskie protsessy na territorii Belorusskogo Poozer'ya [Modern geological processes on the territory of the Belarusian Poozer'e]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2019, no. 1, pp. 163–170. (in Russian)
25. Zernitskaya V. P., Matveev A. V., Rakovich V. A., Kolosov I. L. Pozdnelelednikovaya i golotsenovaya istoriya razvitiya Osveiskogo vodno-bolotnogo kompleksa na severe Belarusi [Lateglacial and Holocene history of the development of the Osveya wetland complex in the north of Belarus]. *Litasfera = Lithosphere*, 2019, no. 1 (50), pp. 26–41. (in Russian)
26. Kruchek S. A. (ed.) [et al.] *Stratigraficheskie skhemy dokembriiskikh i fanerozoiskikh otlozhenii Belarusi : ob'yasnitel'naya zapiska* [Stratigraphic charts of Precambrian and Phanerozoic deposits of Belarus : explanatory note]. Minsk, BelNIGRI Publ., 2010, 282 p. (in Russian)
27. Matveev A. V., Ryllova T. B., Demidova S. V., Yakubovskaya T. V. Izmeneniya v stratigraficheskikh skhemakh neogenovykh i chetvertichnykh otlozhenii Belarusi v svyazi s peresmotrom granitsy mezhdu sistemami [Changes in stratigraphic charts of neogene and quaternary deposits of Belarus due to the revision of the boundary between systems]. *Doklady Natsional'nai akademii navuk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 350–359. (in Russian). doi:10.29235/1561-8323-2019-63-3-350-359
28. Matveev A. V., Demidova S. V., Ryllova T. B., Yakubovskaya T. V. Pogranichnye gorizonty neogenovoi i chetvertichnoi sistem Belarusi (na granite 2,58 mln let) [Boundary horizons of Neogene and quaternary of Belarus (on the boundary 2.58 Ma)]. *Litasfera = Lithosphere*, 2019, no. 1 (50), pp. 15–25. (in Russian)
29. Ryllova T. B., Savchenko I. E. Aleksandriiskoe mezhlednikov'e Belarusi po dannym palinologicheskikh issledovanii [Alexandrian interglacial of Belarus from palynological evidences]. *Litasfera = Lithosphere*, 2011, no. 1 (34), pp. 54–68. (in Russian)
30. Karabanov A. K., Ryllova T. B., Demidova S. V. Problemy stratigraficheskogo raschleneniya pleistotsena Belarusi [Problems of the stratigraphic subdivision of the Pleistocene of Belarus]. *Kvarter vo vsem ego mnogoobrazii. Fundamental'nye problemy, itogi izucheniya i osnovnye napravleniya dal'neishikh issledovanii : materialy VII Vseros. soveshchaniya po izucheniyu chetvertichnogo perioda, Apatity, 12–17 sent. 2011 g. T. 1* [Proc. of the VII All-Russian Quaternary Conf. "The Quaternary in all of its variety. Basic issues, results, and major trends of further research"]. Apatity, 2011, vol. 1 : A–K, pp. 255–258. (in Russian)
31. Ryllova T. B., Savchenko I. E. Rastitel'nost' i klimat territorii zapadnoi chasti Belorusskogo Poles'ya v muravinskoe mezhlednikov'e [Vegetation and climate of the territory of western part of the Belarusian Polesie in Muravian interglacial]. *Litasfera = Lithosphere*, 2018, no. 2 (49), pp. 17–33. (in Russian)
32. Ryllova T. B. Rastitel'nost' i klimat territorii vostochnoi chasti Belorusskogo Poles'ya v muravinskoe mezhlednikov'e [Vegetation and climate of the territory of eastern part of the Belarusian Polesie in Muravian interglacial]. *Litasfera = Lithosphere*, 2020, no. 1 (52), pp. 89–104. (in Russian)
33. Ryllova T. B., Shidlovskaya A. V. Novye palinologicheskie issledovaniya pleistotsenovikh otlozhenii, vskrytykh skvazhinoi u d. Pervomaisk Soligorskogo raiona Minskoi oblasti [New palynological studies of Pleistocene deposits recovered by a borehole near the village of Pervomaisk, Soligorsk district, Minsk region]. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle: issledovaniya transgranichnykh regionov : sb. mater. IV Mezhdunar. Nauch.-prakt. konf., priuroch. k 1000-letiyu g. Bresta, Brest, 12–14 sent. 2019 g. Ch. 1* [Proc. of the IV Int. sci. and practical conf. dedicated to the 1000th anniversary of the city of Brest "Actual problems of the Earth sciences: studies of transboundary regions"]. Brest, part 1, pp. 178–182. (in Russian)
34. Matveev A. V., Zernitskaya V. P. Paleogeomorfologicheskaya skhema territorii zapadnoi chasti Belorusskogo Poles'ya (muravinskoe mezhlednikov'e) [Paleogeomorphological scheme of the western part of Belarusian Polesie (Muravian interglacial)]. *Litasfera = Lithosphere*, 2018, no. 1 (48), pp. 4–11. (in Russian)
35. Matveev A. V. Osobennosti stroeniya zemnoi poverkhnosti Belorusskogo Poles'ya v muravinskoe mezhlednikov'e [Features of the earth's surface structure of the Belarusian Polesie Area in the Muravian interglacial]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021 no. 1, pp. 138–147. (in Russian)
36. Matveev A. V. Geologicheskoe stroenie zemnoi poverkhnosti territorii Belorusskogo Poles'ya v muravinskoe mezhlednikov'e [Geological structure of the earth's surface of the Belarusian Polesye area in the Muravian interglacial]. *Litasfera = Lithosphere*, 2021, no. 2 (55), pp. 63–69. (in Russian)
37. Matveev A. V., Ryllova T. B. Landshafty zapadnoi chasti Belorusskogo Poles'ya v klimaticeskem optimume muravinskogo mezhlednikov'ya [Landscapes of the Belarusian Polesie western area during the climatic optimum of the Muravian Interglacial]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2018, no. 2, pp. 83–94. (in Russian)
38. Ryllova T. B., Matveev A. V., Shidlovskaya A. V. Landshafty vostochnoi chasti Belorusskogo Poles'ya v klimaticeskem optimume muravinskogo mezhlednikov'ya [Landscapes of the Belarusian Polesie eastern area during the climatic optimum of the Muravian interglacial]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2020, no. 2, pp. 64–76. (in Russian)

39. Zernitskaya V. P., Novenko E. Yu., Stančikaitė M., Vlasov B. P. *Izmeneniya okruzhayushchei sredy v pozdnelednikov'e i golotsene na yugo-vostoke Belarusi* [Environmental changes in the Late Glacial and Holocene in the southeast of Belarus]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 5, pp. 584–596. (in Russian). doi:10.29235/1561-8323-2019-63-5-584-596
40. Zernitskaya V. P. *Pozdnelednikov'e i golotsen Belarusi: geokhronologiya, osadkonakoplenie, rastitel'nost' i klimat* [Late Glacial and Holocene of Belarus: geochronology, sedimentation, vegetation and climate]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2022, 303 p. (in Russian)
41. Krzywicki T. [et al.]. *Mapa geologiczna południowej części obszaru przygranicznego Polski i Białorusi (rejon Białej Podlaskiej i Brestu 1 : 250 000) : tekst objaśniający* [Geological Map of Southern part of Polish-Belarusian cross-border area (Biala Podlaska and Brest region 1 : 250 000) : explanatory text]. Warsaw, Polish Geological Institute – National Research Institute, 2017, 129 p. (in Polish)
42. Marks L. [et al.]. *Revised limit of the Saalian ice sheet in central Europe*, Quaternary International, 2018, vol. 478, pp. 59–74. (in English). doi:10.1016/j.quaint.2016.07.043
43. Rylova T. B., Demidova S. V., Shidlovskaya A. V. *Stratigrafiya muravinskikh otlozhenii territorii severo-zapadnoi Belarusi i paleogeograficheskie rekonstruktsii po paleobotanicheskim dannym* [Stratigraphy of the Muravian sediments of the northwestern Belarus and paleogeographic reconstructions according to paleobotanical data]. *Litasfera = Lithosphere*, 2020, no. 2 (53), pp. 50–68. (in Russian)
44. Rylova T. B., Kondratene O. P., Demidova S. V., Sheirene V., Kiselene D., Shidlovskaya A. V., Karabanov A. K. *Muravinskoe/myarkinskoe mezhdlednikov'e na prigranichnoi territorii Belarusi i Litvy* [Muravian/merkine interglacial on the border area of Belarus and Lithuania]. *Litasfera = Lithosphere*, 2021, no. 1 (54), pp. 36–57. (in Russian)
45. Seiriene V., Karabanov A., Baltrūnas V., Karmaza B., Katinas V., Pukelytė V., Rylova T., Demidova S. *Correlation of Eemian sections in Lithuania and Belarus based on palaeomagnetic, radioisotope and palaeobotanic data*, Geological Quarterly, 2021, vol. 65, no. 3, pp. 1–10. (in English). doi:10.7306/gq.1615
46. Zernitskaya V. P., Novenko E. Yu. *Rekonstruktsiya klimata Belarusi v pozdnelednikov'e i golotsene* [Reconstruction of Belarus climate in the Late Glacial and Holocene periods]. *Nauka i innovatsii = The Science and Innovations*, 2016, no. 9 (163), pp. 21–24. (in Russian)
47. Novenko E. Yu., Mazei N. G., Zernitskaya V. P. *Retsentnye sporovo-pyl'tsevye spektry zapovednykh territorii evropeiskoi chasti Rossii kak klyuch k interpretatsii rezul'tatov paleoekologicheskikh issledovanii* [Recent pollen assemblages from protected areas of European Russia as a key to interpreting the results of paleoecological studies]. *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka = Nature Conservation Research*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 55–65. (in Russian). doi:10.24189/ncr.2017.012
48. Stančikaitė M. [et al.]. *Postglacial palaeoenvironmental investigations in neighbouring countries: common questions and joint solutions*, *Aktual'nye problemy nauk o Zemle: issledovaniya transgranichnykh regionov : sb. materialov IV Mezhdunar. Nauch.-prakt. konf., priuroch. k 1000-letiyu g. Bresta, Brest, 12–14 sent. 2019 g. Ch. 1* [Proc. of the IV Int. sci. and practical conf. dedicated to the 1000th anniversary of the city of Brest "Actual problems of the Earth sciences: studies of transboundary regions"]. Brest, part 1, pp. 24–25. (in English)

## Информация об авторах

**Кухарик Евгений Александрович** – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией современной геодинамики и палеогеографии, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: shzhk@mail.ru

**Матвеев Алексей Васильевич** – академик, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: matveyev@nature-nas.by

**Рылова Татьяна Борисовна** – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: rylova\_tatyana18@mail.ru

**Зерницкая Валентина Петровна** – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Беларусь). E-mail: valzern@gmail.com

## Information about the authors

**Evgeniy A. Kukharik** – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Head of the Lab. of Modern Geodynamics and Paleogeography, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: shzhk@mail.ru

**Aleksey V. Matveyev** – Academician, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: matveyev@nature-nas.by

**Tatyana B. Rylova** – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: rylova\_tatyana18@mail.ru

**Valentina P. Zernitskaya** – Ph. D. (Geography), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: valzern@gmail.com

**ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ**  
**GEOGRAPHY. GEOECOLOGY**

---

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-2-86-98>

УДК 551.509.313

Поступила в редакцию 12.10.2022

Received 12.10.2022

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЧИСЛЕННЫХ ПРОГНОЗОВ ПОГОДЫ  
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ОПЕРАТИВНЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ**

С. А. Лысенко, П. О. Зайко

*Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Предложены два подхода к актуализации геофизических характеристик подстилающей поверхности (землепользование, альbedo, листовой индекс, доля поглощенной фотосинтетически активной радиации) в численной модели WRF (Weather Research and Forecasting) для территории Беларуси: обновление среднемесячных значений на основе современных баз данных дистанционного зондирования Земли GLASS (Global Land Surface Satellite) и GLC2019 (Global Land Cover, 2019); ежедневное обновление на основе оперативных спутниковых композитных продуктов MODIS. Для оценки влияния исходных геофизических данных на качество численного прогноза приземной температуры выполнен ряд численных экспериментов по прогнозированию различных синоптических ситуаций в летний период. Рассчитан поправочный коэффициент для альбедо подстилающей поверхности в модели WRF, позволяющий сократить среднеквадратическую погрешность прогноза температуры для заблаговременности +12, +24, +36 и +48 ч на 0,30 °C, 0,10 °C, 0,15 °C и 0,16 °C соответственно. В численных экспериментах инициализация модели WRF с помощью оперативных спутниковых продуктовоказала наиболее положительное влияние на прогноз приземной температуры для ночных сроков: для заблаговременности +24 и +48 ч среднеквадратическая ошибка сократилась на 0,11 °C и 0,14 °C соответственно.

**Ключевые слова:** численный прогноз погоды; WRF; альbedo; листовой индекс; статистическая оценка.

**Для цитирования.** Лысенко С. А., Зайко П. О. Повышение точности численных прогнозов погоды на территории Беларуси с использованием оперативных спутниковых данных // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 86–98.

**IMPROVING THE ACCURACY OF NUMERICAL WEATHER FORECASTS  
IN BELARUS USING OPERATIONAL SATELLITE DATA**

S. A. Lysenko, P. O. Zaiko

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** Two approaches are proposed for updating the geophysical characteristics of the surface (land use, albedo, leaf index, fraction of absorbed photosynthetically active radiation) in the Weather Research and Forecasting (WRF) numerical model for the territory of Belarus: updating the monthly averages based on modern Earth remote sensing databases GLASS (Global Land Surface Satellite), GLC2019 (Global Land Cover, 2019); daily update based on operational MODIS satellite composite products. To estimate the impact of the initial geophysical data on the quality of numerical prediction of surface temperature, a number of numerical experiments were carried out to predict various synoptic situations in the summer period. To assess the influence of on the quality of the numerical prediction of the surface temperature, a number of numerical experiments were performed to predict various synoptic situations in the summer period. A correction factor for the land surface albedo in the WRF model was calculated, which makes it possible to reduce the root-mean-square error of temperature forecast for the lead time of +12, +24, +36 and +48 h by 0.30 °C, 0.10 °C, 0.15 °C and 0.16 °C respectively. In numerical experiments the initialization of the WRF model using operational satellite products had the most positive effect on the surface temperature forecast for nighttime periods: for the lead time of +24 and +48 h the standard error decreased by 0.11 °C and 0.14 °C respectively.

**Keywords:** numerical weather prediction; WRF; landuse; albedo; leaf index; model verification.

**For citation.** Lysenko S. A., Zaiko P. O. Improving the accuracy of numerical weather forecasts in Belarus using operational satellite data. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 86–98.

**Введение.** Мезомасштабные численные модели прогноза погоды прочно вошли в практику работы гидрометеорологических служб. Точность прогнозов этих моделей во многом зависит от качества представления в них начальных и граничных условий. К начальным данным, используемым для инициализации численных моделей прогноза погоды, относятся непосредственно метеорологические параметры (температура, давление, скорость ветра и др.), а также геофизические характеристики подстилающей поверхности, описывающие структуру землепользования, альbedo, растительный и почвенный покров для района составления прогноза. Последние используются в схемах параметризации атмосферных процессов, связанных с пограничным слоем атмосферы и переносом в ней излучения [1].

Данные о геофизических характеристиках подстилающей поверхности (альbedo, листовой индекс, проективное покрытие, доля поглощенной фотосинтетически активной радиации и др.) для региона составления численного прогноза погоды, как правило, получают на основе методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Спутниковые наблюдения используются в численных моделях прогноза погоды, как для уточнения пространственной структуры землепользования и актуализации среднемесячных параметров подстилающей поверхности, так и для получения оценок текущего состояния атмосферы (объективного анализа).

Стоит заметить, что многолетние спутниковые продукты, как правило, составляющие статическую основу численной модели прогноза погоды, не отражают ежедневных изменений характеристик подстилающей поверхности (особенно в зимний и вегетационный периоды) и поэтому должны регулярно уточняться данными оперативных спутниковых наблюдений. Это особенно актуально в современный период глобального потепления. Так, в Беларуси средняя температура воздуха зимой лишь только с 2000 г. возросла почти на 2 °C, что вместе с увеличением продолжительности зимних оттепелей (более чем на 8 дней) существенно повлияло на распределение снежного покрова по территории страны [2, 3]. Не менее значимые изменения климата произошли и для периода вегетации (период года, в который среднесуточная температура устойчиво превышает 10 °C): годовая сумма активных температур (>10 °C) с 1980-х годов возросла почти на четверть, а продолжительность вегетации увеличилась в среднем на 10 дней. Изолинии годовой суммы активных температур за прошедший период потепления в Беларуси сдвинулись на север примерно на 220–280 км.

Подходы к решению задач региональной адаптации численных моделей прогноза погоды и асимиляции (усвоению) в них данных ДЗЗ широко представлены в работах зарубежных авторов, где рассматриваются вопросы оценки влияния структуры землепользования и температурно-влажностных характеристик подстилающей поверхности на точность численных прогнозов погоды, а также выбор оптимальных наборов геофизических данных для уточнения моделей [4–7]. Для Беларуси задачи использования данных ДЗЗ при разработке численных прогнозов погоды до настоящего времени не решались.

В работе [2] нами был впервые для Беларуси проведен анализ влияния изменений структуры землепользования и среднемесячных геофизических характеристик (альbedo, листового индекса и доли поглощенной фотосинтетически активной радиации) на численный прогноз моделью WRF приземной температуры в зимний период. Для обновления оригинальных наборов характеристик подстилающей поверхности в модели WRF нами использованы базы данных дистанционного зондирования Земли GLASS (The Global Land Surface Satellite) и GLC2019 (Global Land Cover, 2019). Показано, что актуализация пространственных распределений характеристик подстилающей поверхности позволяет сократить среднеквадратическую погрешность прогноза температуры на метеорологических станциях Беларуси для заблаговременностей +24 и +48 ч в среднем на 0,35 °C и 0,56 °C соответственно.

В настоящей работе приведены результаты анализа точности численных краткосрочных прогнозов погоды в Беларуси моделью WRF для летнего периода с актуализацией в модели характеристик подстилающей поверхности на основе многолетних и оперативных данных ДЗЗ. Характеристики подстилающей поверхности в модели WRF задавали двумя способами:

– на основе среднемесячных значений альbedo, листового индекса (LAI) и доли поглощенной фотосинтетически активной радиации (FPAR), рассчитанных с привлечением баз данных GLASS и GLC2019;

– на основе ежедневно обновляемых (оперативных) спутниковых продуктов.

Для оценки влияния исходных данных о подстилающей поверхности на результаты численного прогноза приземной температуры проведен ряд численных экспериментов, включающих моделирование различных погодных ситуаций для летнего сезона (42 случая), в том числе случаев с неблагоприятными явлениями погоды. Численные прогнозы, полученные при различных способах инициализации прогностической модели (в части подстилающей поверхности), проходили статистическую оценку качества на основе наземных метеорологических наблюдений.

**Обновленная мезомасштабная система численного прогноза погоды WRF.** В качестве основного инструментария для прогнозирования метеорологических условий на территории Беларуси используется численная мезомасштабная модель атмосферных процессов WRF-ARW (The Weather

Research and Forecasting), которая является негидростатической, интегрирующей уравнения движения на прямоугольной сетке методом конечных разностей [1].

Для описания мелкомасштабных (подсеточных) физических процессов в модели WRF используются схемы параметризации микрофизики, потоков длинноволновой и коротковолновой радиации, теплово-влагообмена в почве, конвекции и турбулентности в планетарном гравитационном слое атмосферы и др. Авторами использована мезомасштабная прогностическая модель WRF-ARW версии 4.3 со следующими характеристиками области моделирования: расчетный домен с координатами  $51^{\circ}\dots56^{\circ}$  с. ш. и  $23^{\circ}\dots33^{\circ}$  в. д., шаг пространственной дискретизации – 3 км ( $220 \times 200$  узлов), шаг интегрирования по времени – 18 сек; 33 вертикальных уровня до 5 гПа. Для параметризации подсеточных физических процессов использованы следующие схемы: микрофизика – схема WRF Single-Moment 6-class, гравитационный слой – схема Университета Ёнсе (Сеул, Корея) (YSU); коротковолновая и длинноволновая радиация – GFDL-схема, прямой учет конвекции.

В качестве начальных и граничных условий во всех численных экспериментах использовались прогнозы глобальной метеорологической модели GFS (Global Forecast System) с шагом сетки  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  [8]. Исходный срок моделирования состояния атмосферы – 00 UTC, заблаговременность прогноза +48 ч с выходными результатами через каждые 12 ч.

В оригинальной версии модели WRF задание характеристик подстилающей поверхности производится с помощью стандартной цифровой базы данных, включающей рельеф, классы землепользования, LAI, альбедо, FPAR, тип почвы и другие параметры.

Актуализация модели WRF для территории Беларуси проведена двумя способами. В первом способе использована обновленная авторами база данных среднемесячных (медианных) характеристик подстилающей поверхности на основе спутниковых продуктов MODIS, AVHRR и PROBA-V за период 2000–2020 гг. Для задания пространственной структуры землепользования использован набор Global Land Cover 2019 (GLC 2019) международной космической программы мониторинга Земли «Copernicus», а для альбедо, LAI и FPAR – база данных Global Land Surface Satellite (GLASS). Сравнительный анализ оригинальной и обновленной баз данных WRF показал существенные различия в пространственной структуре землепользования, листового индекса и альбедо [2]. Актуализация модели WRF в части подстилающей поверхности оказала достоверно положительное влияние на качество численного прогноза температуры в зимний период: среднеквадратическая ошибка прогноза на +36 ч сократилась на  $0.68^{\circ}\text{C}$  [2].

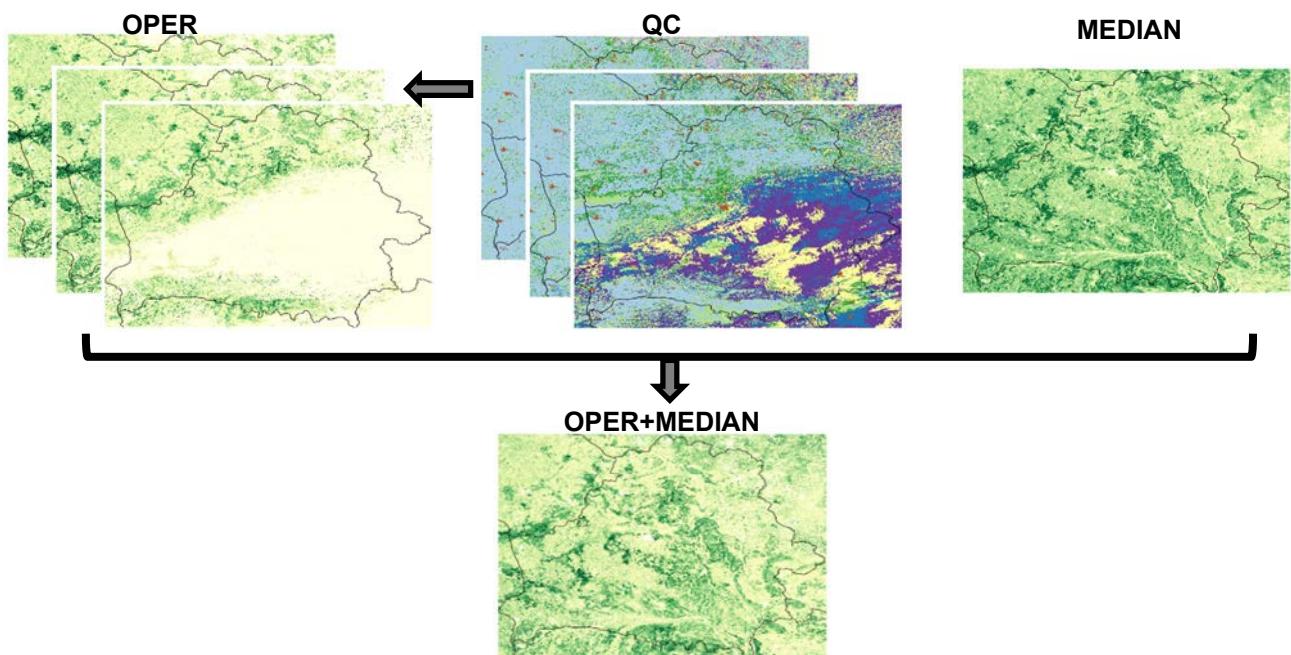
Второй способ актуализации модели подстилающей поверхности основан на использовании ежедневно обновляемых (оперативных) спутниковых продуктов. Как и в первом способе, обновлению подлежали альбедо, LAI и FPAR. Однако в отличие от предыдущего способа использование оперативных спутниковых данных позволяет учитывать ежедневные изменения параметров подстилающей поверхности, зачастую сильно отличающиеся от их среднемесячных климатических значений.

В качестве оперативных спутниковых данных для инициализации численной модели WRF авторами выбраны общедоступные данные спектрорадиометра MODIS – прибора NASA, установленного на космических аппаратах Terra и Aqua. Конкретно авторами использованы следующие информационные продукты MODIS:

- коротковолновое альбедо (MCD43A3) версии 6, уточняемое ежедневно на основе измерений коэффициентов яркости на верхней границе атмосферы в спектральных каналах 1–7 прибора MODIS за предшествующий 16-дневный период (в названии файлов используется дата 9-го дня) [9];
- продукт MCD15A3H, содержащий композитные карты LAI и FPAR за 8-дневный период с разрешением 500 м [10].

Важно отметить, что, несмотря на очевидное преимущество использования ежедневных продуктов ДЗЗ для инициализации численной модели прогноза погоды, данному способу присущи некоторые ограничения, связанные с возможными пропусками в данных, имеющих короткий период временного осреднения. Для решения этой проблемы оперативные спутниковые данные объединены с медианными (климатическими) и на этой основе составлены композитные пространственные распределения характеристик поверхности, равномерно покрывающие весь регион прогноза погоды (рис. 1).

Для автоматизации процедуры подготовки оперативных спутниковых продуктов для модели WRF разработан программный модуль на языке Python, позволяющий формировать и отправлять запросы в формате JSON на сервер Earthdata (системы данных наук о Земле) Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) для заданного региона, загружать на диск пользователя необходимые спутниковые продукты (сферическое альбедо, LAI, FPAR) для заданного временного интервала, контролировать качество продуктов и выполнять их предобработку для модели WRF. Загруженные данные представляют собой пакет GeoTIFF файлов, содержащих помимо самих данных информацию об их качестве (QC) [11].



**Рис. 1. Схема формирования оперативного композитного спутникового продукта LAI (листового индекса):**  
**OPER – оперативные спутниковые карты LAI за ближайший период; QC – индикаторы качества**  
**оперативных спутниковых продуктов; MEDIAN – среднемесячное (медианное) пространственное**  
**распределение LAI; OPER + MEDIAN – композитный оперативный продукт LAI**

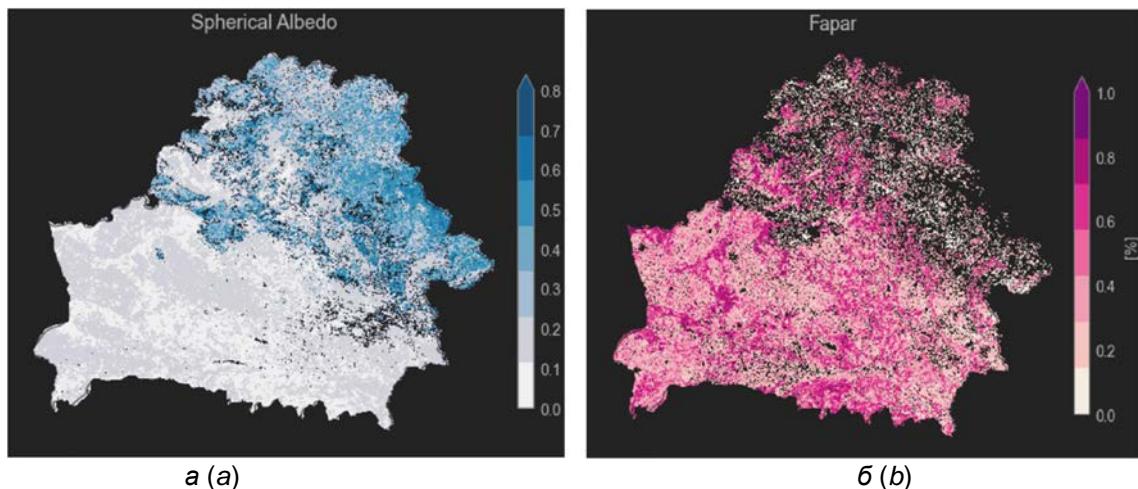
**Fig. 1. Scheme for constructing an operational composite satellite product LAI (Leaf Area Index):**  
**OPER – LAI operational satellite maps for the nearest period; QC is indicators of the quality**  
**of operational satellite products; MEDIAN – average monthly (median) spatial distribution of LAI;**  
**OPER + MEDIAN – composite operational LAI product**

Скачиваемые оперативные информационные продукты MODIS преобразовываются из исходной синусоидальной проекции на сфере в географическую проекцию с равномерной сеткой по широте и долготе с шагом  $0,0042^\circ$  (примерно 500 м для территории Беларусь).

Возможность задания временного интервала для формирования пакета спутниковых данных реализована с целью увеличения количества спутниковых файлов с требуемым уровнем качества для моделируемого региона. Основной причиной снижения качества и появления пропусков в спутниковых данных является облачность, часто попадающая в поле зрения спутникового приемника. Ее присутствие на спутниковых снимках земной поверхности устраняется объединением спутниковых снимков, полученных за разные дни. Более того, такой важный информационный продукт MODIS, как альбедо земной поверхности, в принципе невозможно получить по данным одномоментной спутниковой съемки, поскольку для его вычисления необходимы многодневные измерения коэффициентов яркости земной поверхности при различных зенитных углах Солнца и спутниковых наблюдений. В связи с этим для таких информационных продуктов, как LAI и FPAR (MCD15A3H), используется интервал интегрирования данных 4 дня, а для альбедо подстилающей поверхности (MCD43A3) – 16 дней.

На рис. 2 приведены примеры исходных оперативных спутниковых продуктов альбедо и FPAR, в которых отсутствует ряд значений для территории Беларусь. На следующем этапе обработки данных эти пространственные распределения заполняются либо ближайшими по времени оперативными спутниковыми продуктами, либо их медианными значениями для заданного месяца.

Одним из важнейших этапов подготовки композитных спутниковых карт является контроль качества исходных данных. В разработанном программном модуле реализованы контроль качества информационных продуктов и их агрегация за выбранный пользователем интервал времени. Для этого применены загруженные GeoTIFF-файлы, содержащие основные уровни (флаги) качества (QC) для каждого пикселя спутникового изображения [9, 10].



**Рис. 2. Пространственные распределения сферического альбедо (а) и доли поглощенной фотосинтетически активной радиации для территории Беларуси (б), рассчитанные для модели WRF по оперативным данным MODIS на дату 04.04.2022**

**Fig. 2. Spatial distributions of the spherical albedo (a) and the fraction of absorbed photosynthetically active radiation for the territory of Belarus (b), calculated for the WRF model using MODIS operational data as of the date 04.04.2022**

Для контроля качества информационного продукта MODIS MCD43A3, содержащего 16-дневные композиты альбедо подстилающей поверхности, производится выборка пикселей со значениями флага QC = 0, соответствующими высокому качеству данных [9]. Контроль качества продукта MCD15A3H с 4-дневными композитами LAI и FAPAR более трудоемкий. Флаги качества QC для спутниковых продуктов LAI и FAPAR представляют собой число размером 8 бит, в котором каждый бит дает представление об одной из характеристик состояний атмосферы или детектора оптического сигнала на момент спутниковой съемки (табл. 1) [10].

**Таблица 1. Таблица кодов качества LAI/FPAR**

**Table 1. LAI/FPAR quality control coding table**

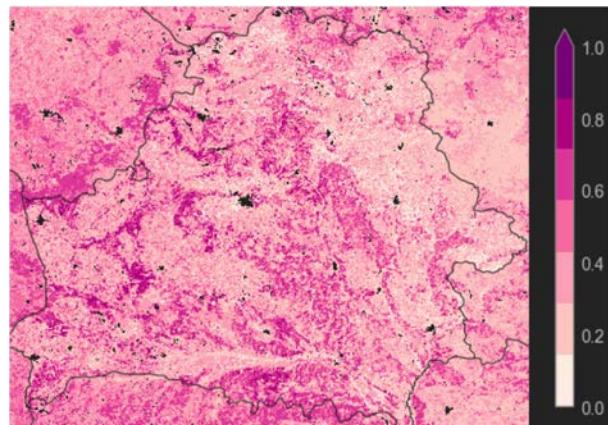
Номер бита	Параметр	Бит	Значение флага
0	MODLAND_QC bits	0	Хорошее качество (основной алгоритм)
		1	Другое качество (резервный алгоритм)
1	Sensor	0	Terra
		1	Aqua
2	DeadDetector	0	Фотодетекторы исправны
		1	Фотодетекторы неисправны
3–4	CloudState	00	Существенных облаков нет (ясно)
		01	Была значительная облачность
		10	Смешанная облачность в пикселях
		11	Состояние облачности не определено, предполагается ясно
5–7	SCF_QC	000	Используемый основной метод, лучший результат
		001	Используется основной метод, хорошо
		010	Сбой основного метода из-за геометрии, эмпирический алгоритм
		011	Сбой основного метода не из-за геометрии, эмпирический алгоритм
		100	Пиксель не воспроизводится

В программном модуле, разработанном для подготовки оперативных спутниковых данных для системы численного прогноза погоды WRF, предусмотрена возможность выбора пикселей с различными флагами качества. По умолчанию для информационных продуктов LAI и FAPAR выбираются пиксели с флагами качества, имеющими нули в битах 0, 2, 3–4 и 6–7. Такие флаги качества означают следующее: высокое качество данных (ноль в бите 0), рабочий режим фотоэлемента (ноль в бите 2), отсутствие облачности (нули в битах 3–4), для инверсии спектральных сигналов (решения обратной

задачи) использован основной алгоритм или эмпирический алгоритм, но с высоким качеством инверсии.

При отборе пикселей спутниковых изображений, учитываемых при составлении композитных продуктов LAI, FAPAR и альбедо, рассматривали все информационные продукты, попадающие в выбранный пользователем временной интервал. Для каждого пикселя итогового композитного продукта осуществляли поиск даты спутниковых наблюдений, в которую для данного пикселя было получено значение требуемого качества. При наличии во временном ряду нескольких таких значений предпочтение отдавали данным, ближайшим по времени к моменту разработки численного прогноза погоды.

Если в результате контроля качества оперативных данных за весь рассматриваемый период для некоторого пикселя не получено ни одного значения требуемого качества, данный пиксель заполняется его медианным значением для заданного месяца, рассчитанным на основе информационных продуктов MODIS за 2010–2021 гг. Таким образом, в формируемых программой композитных спутниковых продуктах могут содержаться как непосредственно оперативные продукты, так и медианные значения параметров LAI, FAPAR и альбедо для соответствующего месяца (см. пример на рис. 3).



**Рис. 3. Композитное распределение FPAR, сформированное на основе оперативных спутниковых продуктов, представленных на рис. 2, и медианного распределения FPAR для данного месяца**

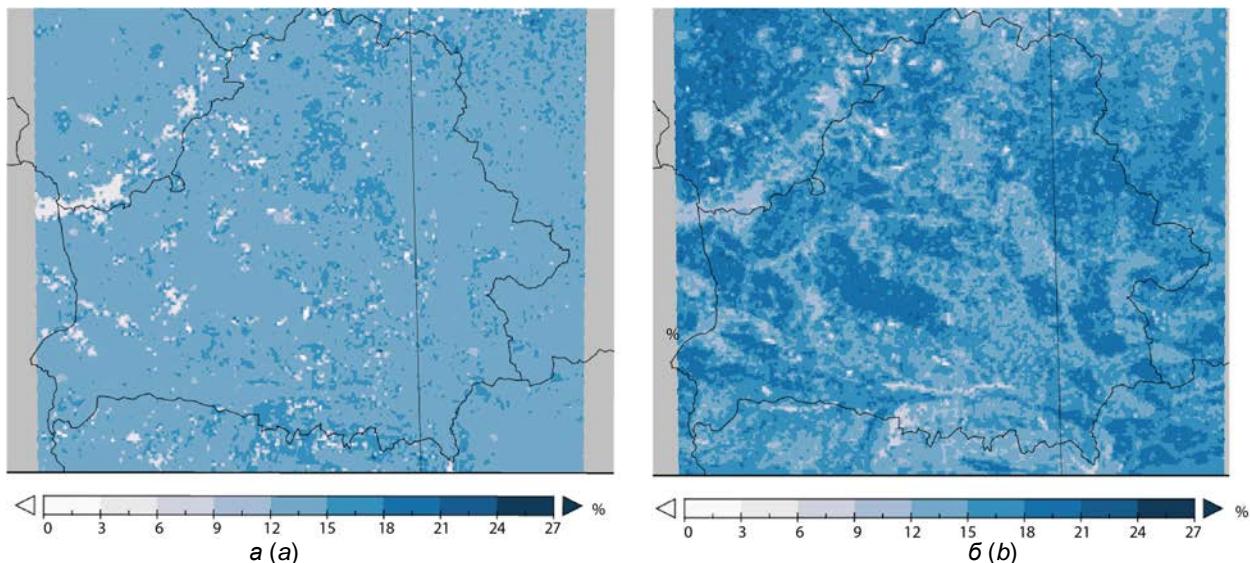
**Fig. 3. Composite distribution of FPAR formed on the basis of operational satellite products presented in fig. 2 and median FPAR distributions for a given month**

Композитные оперативные спутниковые продукты преобразуются в двоичный формат WPS Geogrid Binary, используемый системой подготовки данных WPS (WRF Preprocessing System) для модели WRF [1]. Каждый бинарный файл сопровождается метаданными (пространственное разрешение, шаги по широте и долготе, координаты начального узла и др.) для его корректного распознавания и использования при разработке численного прогноза погоды.

При разработке программного модуля подготовки оперативных спутниковых данных для модели WRF использованы библиотеки, позволяющие обеспечить высокую скорость вычислений при работе с большими массивами данных. Для принципиального ускорения вычислений в разработанном программном модуле используется библиотека JIT-компилиатора Numba [12], который переводит интерпретируемый код на Python в гораздо более быстрый машинный код. JIT-компиляция кода преодолевает проблему блокировки глобального интерпретатора Python и разгоняет приложения Python до уровня C/C++. Кроме того, это делает возможным распараллеливание вычислений.

Обработка в оперативной памяти больших объемов данных достигается с использованием гибкой библиотеки Dask для параллельных вычислений на Python [13]. Библиотека Dask позволяет производить параллельную обработку многомерных массивов путем их деления на несколько более мелких и создания вычислительного графа, обеспечивающего параллельное выполнение вычислений. Преимущество использования Dask заключается в возможности масштабировать вычисления до нескольких ядер на персональном компьютере, что позволяет работать с большими объемами данных.

**Численное моделирование погоды для территории Беларусь.** Сравнение оригинальной базы геофизических данных модели WRF с оперативными спутниковыми продуктами показывает их существенное различие для отдельных периодов. Так, в качестве примера на рис. 4 представлено пространственные распределение альбедо подстилающей поверхности для 1 июня 2021 г. Видно, что значения альбедо из стандартной базы данных WRF значительно ниже полученных по данным ДЗЗ. В частности, на карте композитного спутникового продукта альбедо отчетливо выделяются пахотные земли с достаточно высоким альбедо, которые практически не просматриваются на карте альбедо из стандартной базы данных WRF.



**Рис. 4. Пространственные распределения альбедо подстилающей поверхности:**  
а – оригинальная база данных WRF; б – композитный оперативный спутниковый продукт

**Fig. 4. Maps of the spatial distribution of the surface albedo:**  
a – original WRF database; b – composite operational satellite product

Для оценки влияния исходных геофизических данных на качество численного прогноза погоды для территории Беларуси проведен ряд численных экспериментов, включающих моделирование погодных условий при различных способах задания характеристик подстилающей поверхности:

- без изменений базовых геофизических характеристик модели WRF;
- с использованием структуры землепользования из базы данных GLC 2019 и среднемесячных значений альбедо, LAI и FPAR, рассчитанных для периода 2000–2019 гг. на основе архива спутниковых данных GLASS;
- с использованием оперативных спутниковых продуктов MODIS при сохранении в модели структуры землепользования, соответствующей данным GLC 2019.

Прогнозирование погодных ситуаций осуществляли для летнего периода. В общей сложности промоделировано 42 случая. Каждый численный прогноз проходил статистическую оценку качества с расчетом ошибок с помощью разработанного программного модуля оправдываемости численных прогнозов погоды. Для этой цели была сформирована база данных фактических, трехчасовых наблюдений на метеорологических станциях Беларуси. Оценку проводили в соответствии с рекомендациями Всемирной метеорологической организации (ВМО) [14]. Разработанный модуль позволяет рассчитывать среднюю, абсолютную, систематическую, среднеквадратическую ошибки прогноза и коэффициент корреляции Пирсона для различной заблаговременности прогноза (+12, +24, +36 и +48 ч).

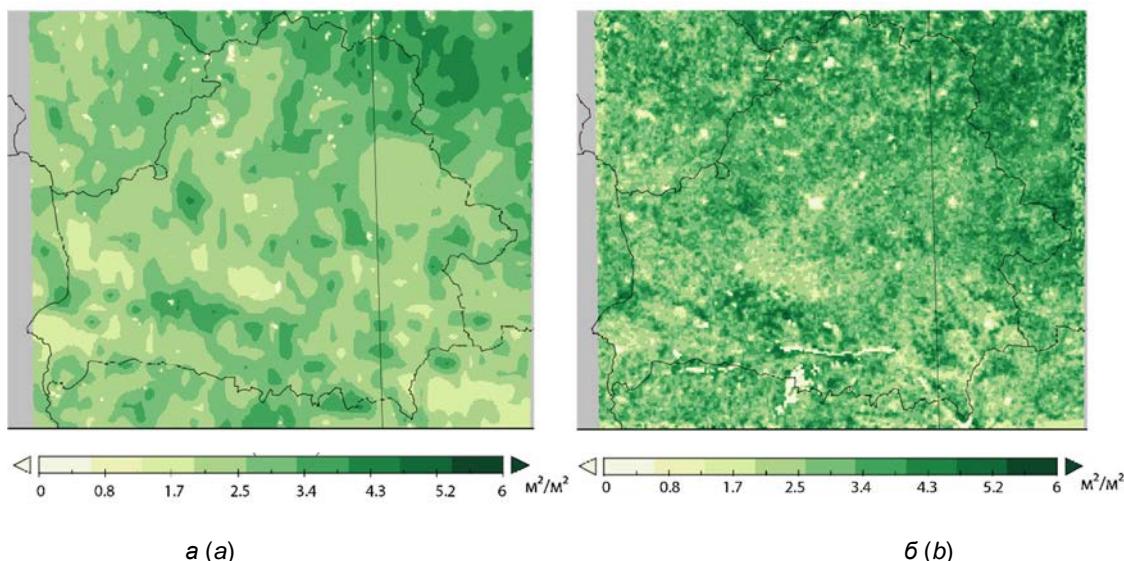
**Оценка влияния исходных геофизических данных на точность численного прогноза погоды для территории Беларуси.** Полученные ранее в статье авторов [2] результаты позволяют говорить о существенном положительном влиянии актуализации среднемесячных характеристик подстилающей поверхности на качество прогноза приземной температуры. Результаты обновления базы геофизических данных в модели WRF выражаются в снижении среднеквадратической погрешности прогноза приземной температуры в зимний период для дневных сроков +12 и +36 ч на 0,53 °С и 1,11 °С соответственно. Для летних случаев такого однозначно положительного результата при использовании тех же наборов обновленных данных достигнуто не было.

В рамках численных экспериментов установлено, что среди изменяемых в модели WRF характеристик подстилающей поверхности наибольшее влияние на результаты численного прогноза температуры оказывает альбедо, роль которого особенно велика в зимние месяцы. В модели WRF определение альбедо подстилающей поверхности может производиться двумя способами: в первом случае значение альбедо присваивается в соответствии со значением класса землепользования, во втором – значение альбедо задается напрямую из базы геофизических данных. В численных экспериментах авторами использован второй подход.

Зимой изменчивость альбедо в первую очередь связана с изменчивостью снежного покрова. Так, значения альбедо для территории, не имеющей снежного покрова, может изменяться от 10–12 % для чернозема до 35 % для песчаных слабоувлажненных почв. При установлении снежного покрова значе-

ния альбено могут достигать 90 %. В этой связи очевидно, что чем точнее модель описывает соответствующее современному периоду распределение снежного покрова в регионе составления прогноза погоды, тем выше качество прогноза. Отсюда, вероятно, и столь существенное повышение точности численного прогноза температуры в зимний период, достигнутое в результате актуализации пространственно-временного распределения альбено поверхности в модели WRF [2].

В летние месяцы важную роль в процессах тепло- и массообмена в гравитационном слое атмосферы играют вегетационные характеристики подстилающей поверхности, такие как LAI и FPAR. Предложенный авторами способ актуализации базовых наборов вегетационных характеристик подстилающей поверхности в модели WRF на основе оперативных спутниковых продуктов позволяет существенно улучшить их временное и пространственное разрешение (рис. 5), однако такая детализация вегетационных характеристик подстилающей поверхности далеко не всегда обеспечивает повышение точности численных прогнозов температуры в летний период.



**Рис. 5. Карты пространственного распределения альбено подстилающей поверхности:**  
а – оригинальная база данных WRF; б – композитный оперативный продукт

**Fig. 5. Maps of the spatial distribution of the surface albedo:**  
a – original WRF database; b – composite operational product

Как уже подчеркивалось ранее, наибольшее влияние на качество численных прогнозов погоды оказывает точность задания альбено подстилающей поверхности. В летний период изменчивость альбено гораздо ниже, чем в зимние месяцы. Средние для летнего периода значения альбено обусловлены распределением по территории различных типов растительного покрова. Так, для широколиственных лесов альбено изменяется в диапазоне 17–20 %, для хвойных – в диапазоне 12–15 %. Для сельскохозяйственных земель в зависимости от стадии развития отдельных культур значения альбено могут варьироваться в пределах 18–28 %. Таким образом, учитывая сравнительно небольшую пространственную и тем более временную изменчивость альбено в летние месяцы, для его адекватного задания в модели прогноза погоды, очевидно, необходима достаточно высокая точность спутниковых измерений.

Как известно, альбено подстилающей поверхности напрямую из космоса не измеряется, а рассчитывается по разновременным измерениям спектральных коэффициентов яркости на верхней границе атмосферы в рамках выбранной модели индикаторы отражения поверхности [9]. Несоответствие этой модели реальным условиям обуславливает возникновение систематической ошибки в определении альбено, влияние которой на качество численного прогноза погоды особенно велико при невысоких значениях альбено (например, в летние месяцы при густом растительном покрове). В этой связи авторами были проведены дополнительные численные эксперименты по прогнозированию метеорологических условий в Беларусь в летний период при различных коэффициентах коррекции альбено из обновленной базы среднемесячных данных WRF. Расчеты выполнены при четырех значениях поправочного коэффициента: 1,0 (сценарий albedo\_100 без коррекции альбено), 0,25 (albedo\_25), 0,5 (albedo\_50) и 0,75 (albedo\_75). Значения LAI и FPAR для региона моделирования во всех экспериментах брали из обновленной базы данных для модели WRF. Дополнительно проводили расчеты с альбено из оригинальной

базы данных WRF (сценарий original), а также с использованием стандартных значений альбедо, но с актуализированными среднемесячными значениями LAI и FPAR (сценарий albedo\_no). В общей сложности было промоделировано более 60 дней с различными вариантами задания альбедо.

Анализ результатов эксперимента показал, что наименьшая среднеквадратическая погрешность прогноза приземной температуры достигается при поправочном коэффициенте для альбедо 0,25, что соответствует занижению значений альбедо, получаемого по данным MODIS, в 4 раза. В этом случае среднеквадратическая погрешность прогноза температуры на метеорологических станциях Беларуси для заблаговременности +12, +24, +36 и +48 ч уменьшается в среднем на 0,30 °C, 0,10 °C, 0,15 °C и 0,16 °C соответственно по отношению к прогнозу без корректировки альбедо (рис. 6).

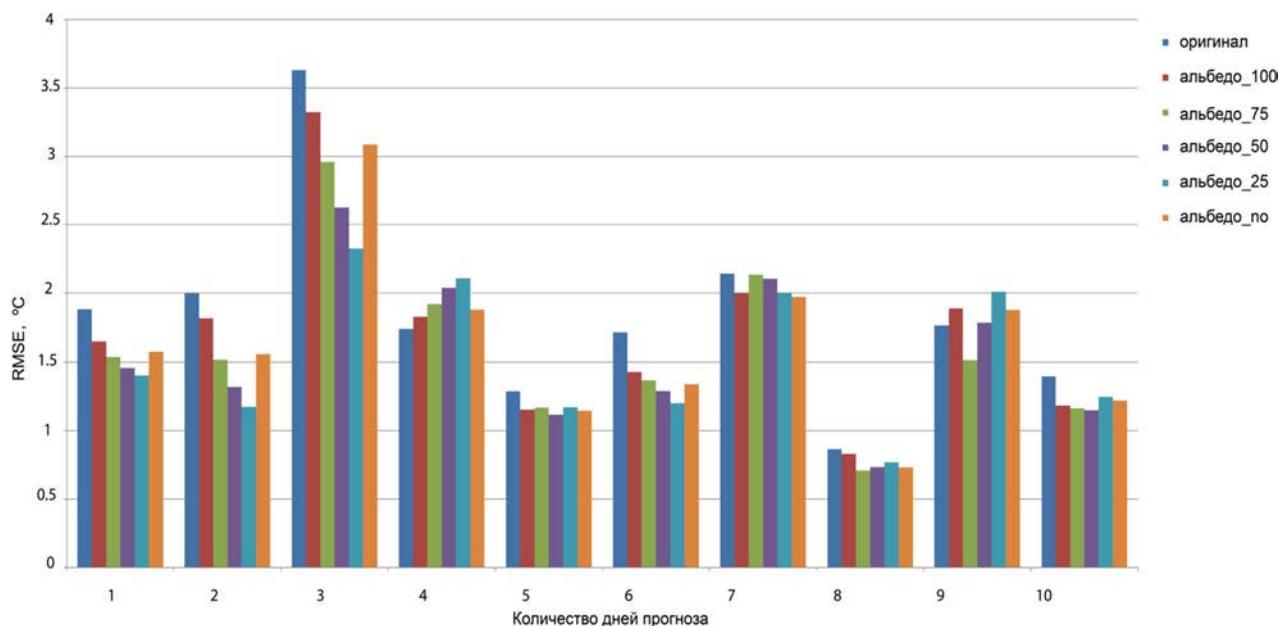


Рис. 6. Среднеквадратическая погрешность (RMSE) численного прогноза приземной температуры воздуха на территории Беларуси с заблаговременностью +12, +24, +36 и +48 ч для десяти смоделированных летних метеорологических ситуаций с различными поправочными коэффициентами для альбедо (альбедо\_100, альбедо\_75, альбедо\_50, альбедо\_25, альбедо\_no)

Fig. 6. Root mean square error (RMSE) of numerical forecast of surface air temperature on the territory of Belarus with a lead time of +12, +24, +36 and +48 h for tenth simulated summer meteorological situations with different albedo coefficients (albedo\_100, albedo\_75, albedo\_50, albedo\_25, albedo\_no)

Представленные на рис. 7 диаграммы прогноза температуры воздуха на 2 м для 1 июня 2019 г. и дневных часов (заблаговременность +12 и +36 ч) говорят о достаточно высокой положительной корреляции между наблюдениями и результатами моделирования с инициализацией поля альбедо с корректировочным коэффициентом 0,25. При указанном коэффициенте точки на рис. 7 имеют минимальный разброс вокруг биссектрисы (красная линия). Для дневных сроков прогноза +12 и +36 ч коэффициент корреляции между наблюденными и смоделированными значениями температуры на метеорологических станциях составляет 0,67 и 0,62 соответственно. Для ночных сроков прогноза +24 и +48 ч корреляция между наблюденными и смоделированными значениями температуры значительно ниже и практически не зависит от корректировочного коэффициента для альбедо, что, очевидно, объясняется малым влиянием коротковолнового солнечного излучения в формировании радиационного и теплового режимов подстилающей поверхности в ночные часы.

Таким образом, наиболее перспективным для оперативных систем мезомасштабного прогнозирования погоды на территории Беларуси для летнего периода представляется подход, предполагающий ежедневную актуализацию геофизических характеристик подстилающей поверхности на основе оперативных спутниковых продуктов с коррекцией альбедо. Наименее успешные результаты численного прогноза температуры при всех заблаговременностях соответствуют оригинальному для модели WRF набору геофизических данных.

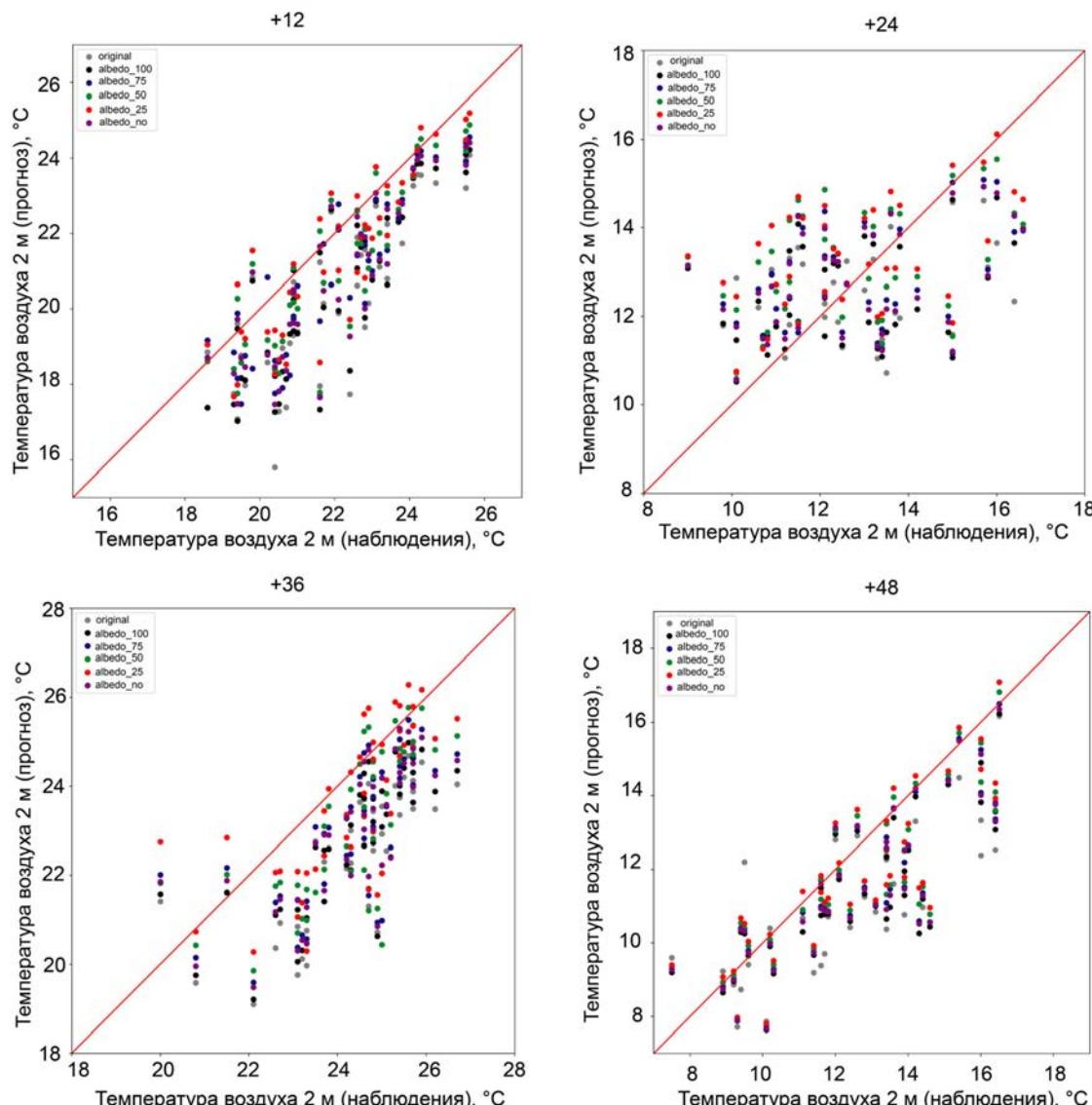


Рис. 7. Диаграмма рассеяния для прогноза температуры воздуха на 2 м (01.06.2019) при различных инициализациях приземного альбедо для заблаговременности +12, +24, +36, +48 ч. Варианты инициализации: original – стандартный набор WRF, albedo\_100 – обновленное альбедо, коэффициент 1, albedo\_75 – обновленное альбедо, коэффициент 0,75, albedo\_50 – обновленное альбедо, коэффициент 0,5, albedo\_25 – обновленное альбедо, коэффициент 0,25, albedo\_no – стандартное поле альбедо WRF, обновление LAI, FPAR

Fig. 7. Scatterplot for the forecast of air temperature at 2 m (01.06.2019) with different initializations of the surface albedo for lead times +12, +24, +36, +48 h. Initialization options: original – standard WRF set, albedo\_100 – updated albedo, coefficient 1, albedo\_75 – updated albedo, coefficient 0.75, albedo\_50 – updated albedo, coefficient 0.5, albedo\_25 – updated albedo, coefficient 0.25, albedo\_no – standard WRF albedo field, update LAI, FPAR

Статистические оценки точности численных прогнозов при рассматриваемых вариантах задания геофизических характеристик подстилающей поверхности приведены в табл. 2. При использовании в модели WRF оперативных данных ДЗЗ с коррекцией альбедо средняя (ME) и систематическая (BIAS) ошибки прогноза приземной температуры воздуха сокращаются на 2 м по отношению как к оригинальному варианту модели WRF, так и к результатам прогноза с использованием обновленных среднемесячных геофизических данных.

Обе схемы обновления геофизических данных в модели WRF приводят к уменьшению среднеквадратической ошибки прогноза температуры для всех заблаговременностей. Для дневных сроков средняя абсолютная (MAE) и среднеквадратическая (RMSE) ошибки прогноза температуры с использованием среднемесячных геофизических данных меньше, чем с использованием оперативных спутниковых продуктов. Для ночных сроков ситуация обратная (см. табл. 2).

**Таблица 2. Показатели точности прогноза приземной температуры системой WRF с оригинальными (ORIGINAL), обновленными среднемесячными (NEW) и обновленными оперативными (OPER) наборами данных о подстилающей поверхности (альбето, LAI, FPAR)**

**Table 2. Statistical accuracy of the WRF surface temperature forecast with original (ORIGINAL), updated climatic (NEW), and updated operational (OPER) surface datasets (albedo, LAI, FPAR)**

Показатель точности	Модель	Заблаговременность, ч			
		+12	+24	+36	+48
ME, °C	ORIGINAL	-0,70	-0,64	-0,38	-0,83
	NEW	0,43	0,51	0,42	0,72
	OPER	-0,27	-0,37	-0,02	-0,43
BIAS	ORIGINAL	0,97	0,95	0,99	0,94
	NEW	1,02	1,23	1,01	2,30
	OPER	0,99	0,97	1,00	0,97
MAE, °C	ORIGINAL	1,62	1,40	1,56	1,50
	NEW	1,30	1,46	1,52	1,65
	OPER	1,45	1,32	1,53	1,39
RMSE, °C	ORIGINAL	1,91	1,71	1,94	1,84
	NEW	1,64	1,75	1,88	1,88
	OPER	1,75	1,60	1,90	1,70

**Заключение.** Авторами рассмотрены различные схемы актуализации характеристик подстилающей поверхности в мезомасштабной системе численного прогноза погоды WRF, основанные на использовании среднемесячных и оперативных продуктов ДЗЗ для территории Беларуси.

Для летнего периода на основе численных экспериментов на модели WRF найден оптимальный корректируочный коэффициент поля альбето для территории Беларуси. Задание при моделировании погоды характеристик подстилающей поверхности на основе оперативных спутниковых данных MODIS с корректировкой альбето позволило сократить среднеквадратическую погрешность прогноза температуры на метеорологических станциях Беларуси для заблаговременности +12, +24, +36 и +48 ч в среднем на 0,30 °C, 0,10 °C, 0,15 °C и 0,16 °C соответственно.

Дальнейшее повышение точности численных прогнозов погоды на территории Беларуси, по мнению авторов, может быть достигнуто за счет как большей детализации в описании подстилающей поверхности за пределами Беларуси, так и ассимиляции в численных моделях прогноза погоды доступных наземных и спутниковых данных об атмосфере, включая профили скорости ветра, температуры и влажности. Перспективным также представляется использование для корректировки численных прогнозов погоды методов машинного обучения. К настоящему времени накоплен достаточно большой статистический материал об ошибках прогноза метеорологических величин с использованием различных численных моделей, который может быть обобщен методами искусственного интеллекта и учтен при финальной обработке численных прогнозов погоды. Все это будет являться предметом дальнейших исследований авторов.

#### Список использованных источников

1. A description of the Advanced Research WRF Model Version 4 / W. C. Skamarock [et al.] // NCAR Techn. Boulder: National Center for Atmospheric Research. – 2021. – P. 165.
2. Лысенко, С. А. Оценки влияния подстилающей поверхности на точность численного прогноза температуры воздуха на территории Беларуси с использованием модели WRF / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 4 (382). – С. 50–68.
3. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования // В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – С. 264.
4. Оценка влияния изменения лесистости центрального региона Восточно-Европейской равнины на летние погодные условия // А. В. Ольчев [и др.] // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2017. – Т. 4. – С. 79–101.

5. A New Land-Use Dataset for the Weather Research and Forecasting (WRF) Model / H. Li [et al.] // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11 (4). – P. 350
6. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m / M. Buchhorn [et al.]: collection 3: epoch 2019: Globe 2020. doi:10.5281/zenodo.3939050
7. Understanding land use change impacts on microclimate using Weather Research and Forecasting (WRF) Model / H. Li [et al.] // Physics and Chemistry of the Earth. – 2017. doi:10.1016/j.pce.2017.01.017
8. Global Forecast System (GFS). [Rules for the citing sources]. – Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs> (accessed 01.06.2022)
9. Schaaf, C.; Wang, Z. MCD43A3: MODIS/Terra and Aqua BRDF/Albedo Daily L3 Global 500 m V006 [Data Set]; NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center: Sioux Falls, SD, USA, 2015.
10. Knyazikhin, Y. MODIS leaf area index (LAI) and fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR) product (MOD 15) algorithm theoretical basis document. – 1999. – 130 p.
11. AppEEARS API Documentation. [Rules for the citing sources]. – Available at: <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/api/> (accessed 01.06.2022)
12. Numba documentation. [Rules for the citing sources]. – Available at: <https://numba.readthedocs.io/en/stable/index.html> (accessed 01.06.2022)
13. Dask User Guide. [Rules for the citing sources]. – Available at: <https://docs.dask.org/en/latest/> (accessed 01.06.2022)
14. Исаев, А. А. Статистика в метеорологии и климатологии / А. А. Исаев. – М. : Изд-во МГУ, 1988. – 248 с.

### References

1. Skamarok V. K. [et al.]. Description of the Advanced Research WRF model version 4. NCAR Techn. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2021, p. 165.
2. Lysenko S. A., Zaiko P. O. Ocenki vliyaniya podstilayushchej poverhnosti na tochnost' chislennogo prognoza temperatury vozduha na territorii Belarusi s ispol'zovaniem modeli WRF [Estimation of the study of the underlying surface on the accuracy of the calculated forecast of air temperature on the territory of Belarus using the WRF model]. *Hydrometeorological research and forecasts*, 2021, no. 4 (382), pp. 50–68. (in Russian)
3. Loginov V. F., Lysenko S. A., Melnik V. I. Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya [Climate Change in Belarus: Causes, Consequences, Regulatory Opportunities]. 2nd ed. Minsk, Encyclopedics Publ., 2020, pp. 264. (in Russian)
4. Olchev A. V., Rozinkina I. A., Kuzmina E. V., Nikitin M. A., Rivin G. S. Ocenka vliyaniya izmeneniya lesistosti central'nogo regiona Vostochno-Evropejskoj ravniny na letnie po-godnye usloviya [Assessment of statistical changes in the forest cover of the central region of the East European zone of observation of summer weather conditions]. *Fundamental and applied climatology*, 2017, vol. 4, pp. 79–101. (in Russian)
5. Li H., Zhang H., Mamtimin A., Fan S., Ju. S. A new land use dataset for the weather research and forecasting model (WRF). *Atmosfera*, 2020, vol. 11 (4), p. 350.
6. Buchhorn M., Smets B., Bertels L., De Roo B., Lesiv M., Zendbazar N.-E., Herold M., Fritz S. Copernicus Global Land Survey: Land cover 100 m: collection 3: Epoch 2019: Globe 2020. doi:10.5281/zenodo.3939050
7. Li X., Mitra C., Dong L., Yang Q. Understanding the impact of land use change on microclimate using a weather research and forecasting (WRF) model, Fizika i Khimiya Zemlya. 2017. doi:10.1016/j.pce.2017.01.017
8. Global Forecast System (GFS). [Rules for citing sources]. Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs> (accessed 01.06.2022)
9. Schaaf C., Wang Z. MCD43A3: MODIS/Terra and Aqua BRDF/Albedo Daily L3 Global 500 m V006 [Data Set]; NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center: Sioux Falls, SD, USA, 2015.
10. Knyazikhin Yu. MODIS leaf area index (LAI) and the proportion of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR) product (MOD 15) algorithm of the theoretical basis of the document. 1999, 130 p.
11. AppEEARS API Documentation. [Rules for citing sources]. Available at: <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/api/> (accessed 01.06.2022)
12. Documentation Numba. [Rules for citing sources]. Available at: <https://numba.readthedocs.io/en/stable/index.html> (accessed 01.06.2022)
13. Dask User Guide. [Rules for citing sources]. Available at: <https://docs.dask.org/en/latest/> (accessed 01.06.2022)
14. Isaev A. A. [Statistika v meteorologii i klimatologii] Statistics in meteorology and climatology. Moscow, Moscow State University Pub., 1988, 248 p. (in Russian)

**Информация об авторах**

*Лысенко Сергей Александрович* – доктор физико-математических наук, профессор, директор, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

*Зайко Полина Олеговна* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

**Information about the authors**

*Sergey A. Lysenko* – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor, Director, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

*Polina O. Zaiko* – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЭВТРОФИРОВАНИЯ ВОДОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ПРИПЯТИ)

А. А. Волчек, Н. Н. Шешко, М. Ф. Кухаревич

*Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь*

**Аннотация.** В статье показана возможность использования спутниковой информации для оценки степени эвтрофирования р. Припяти. Рассмотрен период с апреля 2018 г. по март 2022 г. Трофический статус р. Припяти формируется под влиянием естественных факторов (алгоритмы группы А) и антропогенных воздействий (алгоритмы группы Б). Установлено, что во внутригодовой изменчивости концентрации хлорофилла а наблюдается снижение концентраций хлорофилла а за период с сентября/октября по декабрь/январь и их рост за период с февраля/марта по сентябрь/октябрь. Во внутригодовом разрезе трофический статус р. Припяти по алгоритмам группы А в основном изменяется от α-евтрофного до β-евтрофного, а для группы Б он политрофный. В многолетнем плане изменчивости среднемесячных величин трофический статус р. Припяти в основном по группе А эвтрофный, а по группе Б находится в диапазоне от β-евтрофного до политрофного. Для окончательного вывода о степени эвтрофирования р. Припяти потребуется более продолжительный период наблюдений. Исследование пространственной изменчивости концентрации хлорофилла а по течению р. Припяти не выделило статистически значимых трендов, но в то же время установило влияние притоков.

**Ключевые слова:** вода; река; Припять; спутник; хлорофилл а; эвтрофикация; трофический статус; трофичность; Sentinel-2.

**Для цитирования.** Волчек А. А., Шешко Н. Н., Кухаревич М. Ф. Оценка степени эвтрофирования водотоков с использованием спутниковой информации (на примере реки Припяти) // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 99–111.

## EVALUATION OF THE DEGREE OF WATER CURRENT EUTROPHICATION USING SATELLITE INFORMATION (BY EXAMPLE OF PRIPYAT RIVER)

A. A. Volchek, N. N. Sheshko, M. F. Kukharevich

*Brest State Technical University, Brest, Belarus*

**Abstract.** The article shows the possibility of using satellite information to assess the degree of eutrophication of the river. Pripyat. The period from April 2018 to March 2022 was considered. Pripyat is formed under the influence of natural factors (algorithms of group A) and anthropogenic influences (algorithms of group B). It has been established that in the intra-annual variability of chlorophyll-a concentration, there is a decrease in chlorophyll-a concentrations from September/October to December/January, and an increase in concentration from February/March to September/October. In the intra-annual section, the trophic status of the river. Pripyat according to the algorithms of group A mainly changes from α-eutrophic to β-eutrophic, and for group B it is polytrophic. In the long-term plan of variability of monthly averages, the trophic status of the river. Pripyat is mainly eutrophic in group A, and in group B it ranges from β-eutrophic to polytrophic. For the final conclusion about the degree of eutrophication of the river. Pripyat will need a longer observation period. Study of the spatial variability of the concentration of chlorophyll-a along the river. Pripyat did not identify statistically significant trends, but at the same time established the influence of inflows.

**Keywords:** water; river; Pripyat; satellite; chlorophyll-a; eutrophication; trophic status; trophicity; Sentinel-2.

**For citation.** Volchek A. A., Sheshko N. N., Kukharevich M. F. Evaluation of the degree of water current eutrophication using satellite information (by example of Pripyat river). *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 99–111.

**Введение.** Оценка эвтрофикации водотоков и водоемов является важной теоретической и практической задачей. В общем смысле эвтрофикация – это процесс, в ходе которого в водном объекте происходит накопление биогенных элементов, что сопровождается увеличением его биологической продуктивности. Этот естественный процесс в ряде случаев усиливается антропогенными факторами. Именно антропогенная эвтрофикация представляет в настоящее время большую угрозу, так как она значительно ускоряет процесс эвтрофикации водотоков и водоемов, слабо контролируется в связи с отсутствием или несовершенством очистных сооружений. Эвтрофикация приводит к материальным потерям в рыбном хозяйстве, рекреации, промышленности, водоснабжении и т. д.

В более конкретном смысле, согласно Л. И. Цветковой, эвтрофикация – «это процесс постепенного перехода водоема из дистрофного или олиготрофного состояния в эвтрофное, в основе которого лежит смещение биотического баланса экосистемы в сторону накопления первичного органического вещества вследствие преобладания скорости образования органических веществ (продукции) над скоростью их разложения (деструкции)» [1]. В данном определении под упомянутыми состояниями водного объекта понимается его трофический статус (тrophность), который в некоторой степени выступает в качестве характеристики экологического состояния водного объекта [1].

Для оценки трофического статуса водного объекта и для целей прогнозирования его изменений проводится ряд исследований, включающих анализ состава воды в лаборатории на содержание кислорода, соединений фосфора, нитратов, органических веществ, хлорофилла и прочих параметров [2], что весьма время- и трудозатратно. В настоящее время находят применение методы оценки трофности, основанные на использовании данных дистанционного зондирования. Основным преимуществом методов дистанционного зондирования является возможность получения достаточно регулярных данных с приемлемой точностью, что обеспечивается высоким пространственным и времененным разрешением.

В качестве параметров оценки трофического статуса водного объекта по данным дистанционного зондирования используется ряд характеристик, однако наибольший интерес и относительную простоту дает использование сведений о концентрации содержания хлорофилла а, так как данное вещество относительно хорошо детектируется со спутников.

Основной работой при использовании сведений о содержании хлорофилла а в воде водного объекта по данным дистанционного зондирования является выбор алгоритма взаимосвязи между концентрацией хлорофилла а и данными снимков, который включает подбор индекса соотношения спектров электромагнитного излучения и формы взаимосвязи величин. Несмотря на значительное количество индексов и алгоритмов индивидуальных для каждого водного объекта, важное значение представляет получение универсального алгоритма для широкого спектра водных объектов.

Цель работы – обосновать выбор алгоритмов по распознаванию содержания хлорофилла а в воде рек, полученных по данным дистанционного зондирования, для оценки степени эвтрофирования р. Припять в среднем и нижнем ее течении.

Объектом исследования выбрана р. Припять на участке от г. Пинска до впадения ее в р. Днепр. Припять, средняя по европейским меркам река, протекает в пределах территории Украины и Беларуси. Ее длина составляет 761 км, из которых по Беларуси – 500 км. Площадь водосбора р. Припяти на территории Беларуси составляет 52,7 тыс. км<sup>2</sup>. Долина реки слабо выражена и имеет ширину от 70–75 м до 5 км. Русло р. Припяти в ее верховье канализировано, а на остальном протяжении извилистое, поэтому встречаются меандры, старицы, заливы, песчаные острова. Ширина реки на участке от истока до р. Староход – 4–15 м, далее – 50–70, а в низовье – 100–250 м. Берега встречаются как пологие, так и крутые. Максимальный уровень воды на некоторых участках реки поднимается от 2 до 7 м и выпадает обычно на первую половину апреля. Замерзает река в первой половине декабря, а вскрытие ее происходит в конце марта [3, 4].

**Материалы и методы исследования.** В основу исследования положены данные дистанционного зондирования космической программы Sentinel за период с апреля 2018 г. по март 2022 г. Sentinel – это система спутников, реализованная в рамках программы Европейского Союза «Copernicus» по наблюдению за Землей [5] и ее глобальной динамикой (изучение облачности, радиационного баланса и биоклиматических параметров атмосферы, поверхности суши и океанов) [6]. В настоящее время программа насчитывает пять миссий, каждая из которых фокусируется на различных аспектах наблюдения за Землей [7]. Важными преимуществами системы Sentinel являются высокое разрешение, открытый доступ и широкий пространственно-временной охват. Стоит отметить, что главный аспект использования систем Sentinel – наличие спектрального канала в 704 нм, который детектирует хлорофилл.

Среди миссий системы Sentinel выбор остановлен на миссии Sentinel-2, которая включает два спутника, запущенных с целью мониторинга растительности, почвы и прибрежных районов. На обоих спутниках данной миссии установлен оптико-электронный мультиспектральный датчик (MSI) для съемки с разрешением от 10 до 60 м в видимом, ближнем инфракрасном (VNIR) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах спектра, представленных 13 спектральными каналами, что обеспечивает улавливание различий в состоянии растительности, включая временные изменения, а также минимизирует влияние на качество снимков атмосферы.

Загружаемые с серверов программы Sentinel-2 материалы со спутников А и В представлены архивами с набором данных, где основное место занимает растровое изображение различных спектральных каналов. Данные растры, в свою очередь, представлены двумя уровнями в зависимости от степени их обработки – 1С и 2А (излучение верхней и нижней части атмосферы соответственно). В этом исследовании в качестве уровня обработки снимков Sentinel-2 использован уровень снимков 2А. Данные продукты предоставляют собой изображения отражательной способности нижней части атмосферы (BOA), сгенерированные с использованием процессора Sen2Cor из продуктов уровня 1С, что не требует производить собственноручно атмосферную, геометрическую и прочие корректировки данных.

Большинство исследований содержания хлорофилла а в воде водных объектов по данным дистанционного зондирования включают в себя полевые работы, обработку данных зондирования и разработку алгоритма, который является главным результатом данных исследований. Разработанный для водного объекта алгоритм представляет собой формулу взаимосвязи между величиной излучения водной поверхности и измеренными концентрациями хлорофилла а. В рамках данной работы предпринята попытка определения концентраций хлорофилла а в воде р. Припяти существующими алгоритмами, верифицированных натурными исследованиями.

Методы исследования, использованные в работе, в основной массе реализованы в программной среде ArcGIS, обладающей широким функционалом обработки растрового изображения, модулем автоматизации ModelBuildung и растровой алгеброй.

Условно методы исследования можно разделить на такие этапы, как: подготовительный; предварительная обработка материалов; расчет концентраций хлорофилла а; постобработка результатов; анализ результатов.

**Подготовительный этап.** Первоначально на подготовительном этапе нами рассмотрено несколько источников данных дистанционного зондирования, из которых выбор остановлен на Sentinel по ранее отмеченным причинам, основными из которых являются наличие спектрального канала с длиной волны в 704 нм и высокое разрешение снимков.

Затем выполнена выгрузка материалов дистанционного зондирования необходимого уровня с серверов Sentinel-2 с последующей организацией базы данных.

На основании объекта исследований и имеющегося источника данных осуществлен выбор алгоритмов расчета концентрации хлорофилла а. В настоящее время выделяют несколько групп алгоритмов в зависимости от используемых спектральных каналов:

- Nir-Red-алгоритмы – используют красный и инфракрасный спектры;
- Red-Green-алгоритмы – используют красный и зеленый спектры;
- Red-blue-алгоритмы – используют красный и синий спектры;
- Blue-green-алгоритмы – используют синий и зеленый спектры;
- комбинированные алгоритмы – используют от трех разных диапазонов спектров.

Так как воды р. Припяти относятся к водам 2-го типа (мутные воды), нами выбраны алгоритмы типа Nir-Red, которые, по мнению некоторых авторов [8–11], для этого типа вод дают хорошие результаты (табл. 1).

**Таблица 1. Алгоритмы расчета концентрации хлорофилла а по данным Sentinel-2**

**Table 1. Algorithms for calculating the concentration of chlorophyll-a according to Sentinel-2**

Алгоритм – исходный индекс (в каналах Sentinel-2)	Формула связи, Chl	Водный объект
1. $NDCI = (R_{B05} - R_{B04}) / (R_{B05} + R_{B04})$	$14,039 + 86,115x + 194,325x^2$	Река Поти (Бразилия) [12]
2. * $MCI = R_{B05} - R_{B04} ((R_{B05} - R_{B04})(705 - 664) / (865 - 664))$	$1726,50x + 18,29$	Озера Иезнас, Ширвис, Гостус и Швентас (Литва) [13]
3. $2BDA = R_{B05}^{-1} R_{B04}$	$41,80x - 15$	Озерный край Мекленбург – Бранденбург (Германия) [14]
4. $NDCI = (R_{B05} - R_{B04}) / (R_{B05} + R_{B04})$	$1,586 + 235,556x - 300,260x^2$	Горьковское водохранилище (Россия) [3]
5. * $YA10 = (R_{B04}^{-1} - R_{B05}^{-1}) / (R_{B06}^{-1} + R_{B05}^{-1})$	$43,20x - 10,2$	Озеро Эрмисту (Эстония) [15]
6. * $3B = R_{B05} - ((R_{B04} + R_{B06}) / 2)$	$2231x - 12,7$	Озера Нохипало Валгяярв, Пюхаяярв, Рыуге Сууръярв, Вийтна, Пиккъярв, Эхияярв, Карияярве, Кеери, Кесму, Лохья, Выртсъярв, Чудское озеро (Эстония) [16]
7. $3BDA = R_{B06} \left( R_{B04}^{-1} - R_{B05}^{-1} \right)$	$260,1x - 27,9$	Чудское озеро (Эстония) [15]
8. $2BDA = R_{B05}^{-1} R_{B04}$	$25,985x^{3,117}$	Районы шлейфа реки Сагино и реки Кавкаултин озера Гурон (США) [17]
9. * $MCI = R_{B05} - 1,005 (R_{B04} + (R_{B06} - R_{B04})(705 - 665) / (740 - 664))$	$2158x - 3,9$	Озеро Эри (США) [18]
10. $3BDA = R_{B06} \left( R_{B04}^{-1} - R_{B05}^{-1} \right)$	$104,1x^2 + 221,1x + 2$	Водохранилища Альбуфера, Беллус и Бениаррес (Испания) [19]

\*Алгоритмы, требующие деления значений пикселей на 10 000.

Примечания: R – используемые каналы спутников А и В программы Sentinel-2; x – значение индекса.

Серым и белым цветом в таблицах отмечены формулы и результаты вычислений, соответствующие алгоритмам группы А и алгоритмам группы Б соответственно.

Окончательный выбор конкретных алгоритмов обусловлен тем, что их разработали на основе данных Sentinel-2 и тем, что некоторые из них созданы для схожих климатических и природных зон, схожих водных объектов. Часть рассмотренных алгоритмов не адаптирована для исследуемого объекта, что может отразиться на результатах.

**Предварительная обработка материалов.** Начальная стадия данного этапа предусматривала визуальный анализ растрор данных дистанционного зондирования с целью обнаружения потенциальных аномалий, обусловленных присутствием областей затенений, отмелей, льда и облаков. Данные аномалии могут приводить к появлению некорректных результатов, что будет рассмотрено ниже. После нахождения аномальных зон созданы маски, по которым данные зоны удалены из используемых растрор.

Для вычисления концентрации хлорофилла а непосредственно в пределах русла р. Припяти определена область, соответствующая усредненному во времени руслу с помощью индекса NDWI [20]. После использования этого индекса осуществлялена корректировка полигона русла для большего его усреднения, удаления артефактов преобразования раstra из значений индекса NDWI в полигон и для дополнительного поиска аномальных зон и пикселей.

Имеются усредненный полигон русла р. Припяти и обработанные раstry, которые были обрезаны по полигону русла, а затем объединены путем склеивания и осреднения в единый среднемесячный растр.

Несмотря на то что р. Припять исследована не на всей протяженности и что спутники А и В программы Sentinel-2 обладают весьма высокой регулярностью съемки, за один пролет снимки охватывают лишь часть рассматриваемого участка реки. По этой причине среднемесячный растр представляет собой объединенный по длине реки набор растрор разных дат съемок. Также отчасти ограниченный охват приводит к тому, что регулярность съемки одно и того же участка реки ниже регулярности пролета спутников. Поэтому в месяц на один и тот же участок реки выпадает всего несколько полностью совпадающих снимков и небольшое количество смежных снимков. Помимо этого, на «регулярность съемки» влияют состояние атмосферы и водной поверхности, что приводит к получению еще меньшего числа пригодных снимков.

Эти особенности оказывают влияние на то, что среднемесячную концентрацию хлорофилла а по данным дистанционного зондирования рассчитывают по осредненным снимкам нескольких дней месяца. В некоторых месяцах снимки отдельных участков реки могут вообще отсутствовать.

**Расчет концентраций хлорофилла а.** Вычисления концентраций хлорофилла а, как и многие работы с мультиспектральным растром, осуществлены в среде ArcGIS, которая обладает алгеброй карт, что позволяет выполнять над растром математические операции.

Расчет концентраций осуществлен в соответствии с формулами, представленными в табл. 1. По результатам вычислений получены раstry концентраций хлорофилла а, при анализе которых обнаружены пиксели с аномально большими или малыми значениями (рис. 1). Для исключения таких пикселей проведена постобработка.

**Постобработка результатов.** Изучив места расположения пикселей с аномальными значениями, можно сделать вывод, что данные пиксели соответствуют суще, отмели или иным источникам помех (рис. 1), а дополнительно проанализировав величины аномальных пикселей и их частоту, можно утверждать, что подтвержден случайный характер их появления (выбросы выборки) (рис. 2).

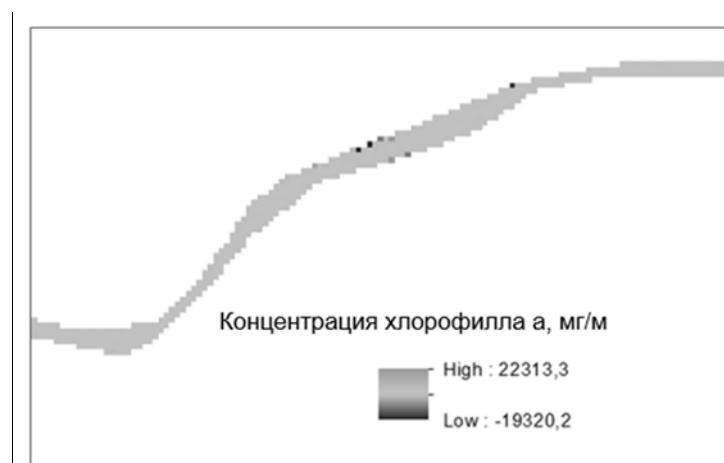
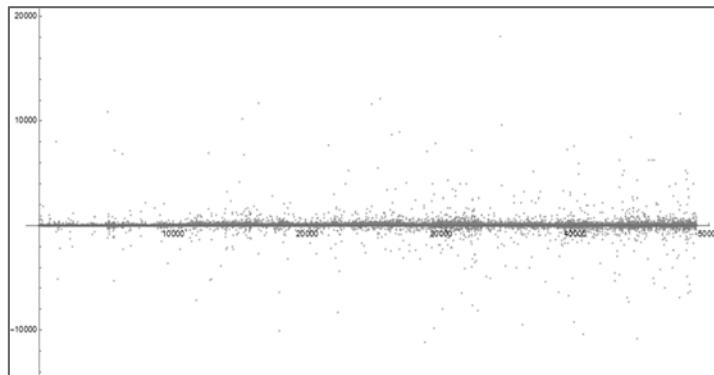


Рис. 1. Аномальные пиксели концентрации хлорофилла а

Fig. 1. Abnormal pixels of chlorophyll-a concentration



**Рис. 2. Разброс значений раstra концентрации хлорофилла а**

**Fig. 2. The spread of values of the chlorophyll-a concentration raster**

Для поиска выбросов выборки использовали метод 1.5 IQR, который предусматривает применение критериев на основе медианы, так как она в отличие от средней величины значительно менее подвержена воздействию выбросов выборки. При определении величин квартилей и величины межквартильного расстояния исходили из предположения, что выбросы выборки находились за пределами 1,5 межквартильного расстояния. Для установления границ значений аномальных пикселей использовали в соответствии с методом 1.5 IQR следующие условия:

$$[(x_{25} - 1,5(x_{75} - x_{25})), (x_{75} + 1,5(x_{75} - x_{25}))],$$

где  $x_{25}$  и  $x_{75}$  – первый и третий квартиль выборки, соответствующие 0,25 и 0,75 квантилям.

В исследовании [21] для значений пикселей устанавливали границы от 0 до 150 мг/м<sup>3</sup>. Нижний передел был обусловлен отсутствием отрицательных значений, а верхний предел соответствовал максимальной концентрации, установленной в ходе полевых исследований. В случае выхода за нижний предел значений пиксели исключались, тогда как при выходе за верхний предел приравнивали к максимальной величине. В нашем случае при выходе за пределы границ все значения исключали. Помимо установленных методом 1.5 IQR границ для растров с отрицательными пикселями, дополнительно применяли граничное значение, равное нулю для удаления отрицательных пикселей.

**Анализ результатов.** В ходе исследования дана оценка пространственно-временной изменчивости среднемесячных величин концентраций хлорофилла а для использованных нами алгоритмов, а также дана оценка трофического статуса реки как характеристики степени ее эвтрофирования.

Оценка временной изменчивости проведена путем построения временного ряда среднемесячных величин за период исследования с последующим визуальным анализом графиков. Внутригодовая изменчивость оценена по осредненным за несколько лет среднемесячным величинам концентраций хлорофилла а по месяцам.

Изучение пространственной изменчивости часто предусматривает исследования водного объекта по ширине и длине. Однако в нашем случае проведено исследование только по длине реки (по течению), так как ширина реки преимущественно незначительна и составляет в пиксельном эквиваленте зачастую всего несколько единиц пикселей. Для изменчивости концентрации хлорофилла а по течению реки использован инструмент программной среды ArcGIS, который на основании линейного объекта (направления русла реки) и растра величин (растра концентраций) создает таблицу с данными и график пространственной изменчивости величин растра.

Помимо стандартного анализа пространственной изменчивости концентрации хлорофилла а по течению реки, исследованием предусмотрен предварительный анализ влияния на величину концентрации хлорофилла а в воде р. Припять вод ее притоков. Предполагается, что за счет стока воды с притоков, в точках впадения их в р. Припять возможно изменение величин концентрации хлорофилла а в водах самой этой реки, из-за процессов разбавления или еще большего насыщения хлорофиллом а вод. Это следствие предполагается использовать для оценки трофического состояния с помощью данных дистанционного зондирования для рек и водотоков, которые нельзя исследовать системами дистанционного зондирования напрямую.

Для оценки трофического статуса р. Припять в исследовании использована разработанная на основании ряда работ шкала трофности Китаева [22] (табл. 2), примененная для оценки трофического статуса водотоков в исследовании [23, 24].

**Таблица 2. Шкала трофического статуса по содержанию хлорофилла а****Table 2. Trophic status scale based on chlorophyll-a content**

Тип водоема	Содержание хлорофилла, мг/дм <sup>3</sup>	Тип водоема	Содержание хлорофилла, мг/дм <sup>3</sup>
Ультра олиготрофный	<1,5	α-Евтрофный	12–24
Олиготрофный	1,5–3	β-Евтрофный	24–48
α-Мезотрофный	3–6	Политрофный	>48
β-Мезотрофный	6–12		

**Результаты и их обсуждение.** В ходе исследования концентраций хлорофилла а с помощью предложенных подходов установлено: несмотря на некоторую сопоставимость порядков значений, явно просматривается разделение существующих алгоритмов на две основные группы (табл. 3). Так, первая группа (группа А), представленная алгоритмами 1, 2, 3, 4, 6, 9, характеризуется более низкими значениями измеренных концентраций (см. табл. 3) по отношению ко второй (группа Б) с алгоритмами 5, 7, 8, 10. Диапазон изменчивости значений концентраций хлорофилла а для группы А расположился в интервале от 1,7 до 62,1 мг/дм<sup>3</sup>, а для группы Б – в интервале от 2,4 до 189,4 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 3). Важно отметить, что разделение алгоритмов на группы в основном соответствует используемым в алгоритмах индексам. Так, в основном одни и те же индексы попали в одинаковые группы алгоритмов.

**Таблица 3. Среднемесячные концентрации хлорофилла а в воде р. Припяти****Table 3. Average monthly concentrations of chlorophyll-a in the water of the Pripyat River**

Дата	Концентрация хлорофилла а по алгоритмам, мг/дм <sup>3</sup>									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
04.2018	–	22,7	32,0	14,5	25,3	18,9	52,4	37,7	7,7	24,8
05.2018	23,1	23,0	34,8	19,9	149,1	16,7	77,3	45,0	11,0	47,8
06.2018	32,6	31,6	42,6	31,3	54,4	29,4	100,1	70,9	20,5	71,5
07.2018	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
08.2018	33,2	34,2	43,1	32,0	55,9	31,6	101,2	72,5	22,7	72,7
09.2018	41,6	39,9	49,8	38,3	60,8	38,5	121,7	102,1	29,5	95,6
10.2018	52,2	38,5	58,4	43,3	39,5	39,4	120,5	152,0	27,2	94,1
11.2018	28,2	29,5	39,0	26,3	20,7	31,1	60,5	58,3	14,1	32,4
12.2018	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<b>2018</b>	<b>33</b>	<b>31</b>	<b>43</b>	<b>29</b>	<b>58</b>	<b>29</b>	<b>91</b>	<b>77</b>	<b>19</b>	<b>68</b>
01.2019	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
02.2019	11,6	20,3	24,2	11,4	7,5	23,3	21,3	21,3	5,7	9,7
03.2019	18,1	26,2	30,4	13,6	14,1	29,5	39,5	34,2	8,3	15,6
04.2019	38,4	35,3	47,2	35,8	36,0	35,3	96,8	89,5	22,2	67,9
06.2019	23,8	22,1	35,4	20,8	103,7	15,9	81,4	46,7	10,1	52,1
07.2019	32,5	27,4	42,5	31,2	90,3	18,4	132,9	70,4	22,1	108,6
08.2019	38,9	35,6	47,6	36,6	79,5	32,1	127,6	91,6	25,8	102,2
09.2019	39,7	37,8	48,2	36,9	56,8	36,5	116,1	95,4	27,3	89,5
10.2019	56,2	45,1	62,1	44,3	55,9	45,2	150,3	189,4	35,7	128,3
11.2019	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12.2019	24,3	31,8	35,9	24,1	19,7	34,6	55,4	48,1	16,7	30,8
<b>2019</b>	<b>32</b>	<b>31</b>	<b>42</b>	<b>28</b>	<b>52</b>	<b>30</b>	<b>91</b>	<b>76</b>	<b>19</b>	<b>67</b>
01.2020	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
02.2020	45,2	38,2	52,7	39,8	36,2	39,7	104,9	119,5	26,0	76,8
03.2020	55,8	49,0	61,4	44,7	51,3	50,1	143,5	170,6	39,3	120,9
04.2020	46,6	45,1	53,8	40,6	43,3	47,1	120,5	125,2	34,6	94,4
05.2020	43,6	41,1	51,4	39,0	72,0	39,0	135,1	112,3	32,1	111,4
06.2020	28,9	31,9	39,6	27,4	89,8	27,6	98,1	60,2	22,4	69,5
07.2020	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
08.2020	37,3	35,8	46,3	35,4	79,6	31,5	122,1	86,3	25,8	95,8
09.2020	43,6	36,6	51,3	39,6	98,3	32,3	145,8	109,1	27,6	123,6
10.2020	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
11.2020	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12.2020	17,9	26,6	30,3	14,1	12,2	29,9	35,3	33,9	8,0	11,2

Окончание табл. 3  
Ending table 3

Дата	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>2020</b>	<b>40</b>	<b>38</b>	<b>48</b>	<b>35</b>	<b>60</b>	<b>37</b>	<b>113</b>	<b>102</b>	<b>27</b>	<b>88</b>
01.2021	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
02.2021	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
03.2021	22,8	22,7	34,4	20,5	15,9	20,7	46,4	45,1	7,2	21,4
04.2021	18,9	23,0	31,3	12,8	25,1	19,7	49,0	35,8	7,8	21,3
05.2021	18,2	20,2	30,7	12,7	31,7	15,5	48,1	34,2	5,9	22,7
06.2021	26,9	25,4	38,0	25,1	124,0	18,7	101,8	54,5	21,5	73,4
07.2021	33,6	33,8	43,4	32,3	63,5	27,3	124,3	74,0	27,4	99,8
08.2021	30,7	32,7	41,0	29,5	41,1	31,9	84,9	64,8	20,6	55,8
09.2021	42,6	35,0	50,6	39,1	69,7	32,5	131,9	109,6	25,4	107,8
10.2021	36,3	32,6	45,5	34,4	32,4	33,0	90,0	83,5	19,5	61,2
11.2021	43,6	38,8	51,4	38,1	36,6	40,1	105,1	113,9	26,5	77,8
12.2021	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<b>2021</b>	<b>30</b>	<b>29</b>	<b>41</b>	<b>27,2</b>	<b>49</b>	<b>27</b>	<b>87</b>	<b>68</b>	<b>18</b>	<b>60</b>
01.2022	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
02.2022	14,0	22,0	26,7	1,7	9,6	24,6	27,5	25,9	3,1	2,4
03.2022	14,2	20,4	26,9	2,0	13,4	18,3	28,6	26,2	3,5	2,8
<b>Среднее</b>	<b>32</b>	<b>32</b>	<b>42</b>	<b>28</b>	<b>52</b>	<b>30</b>	<b>91</b>	<b>77</b>	<b>20</b>	<b>66</b>

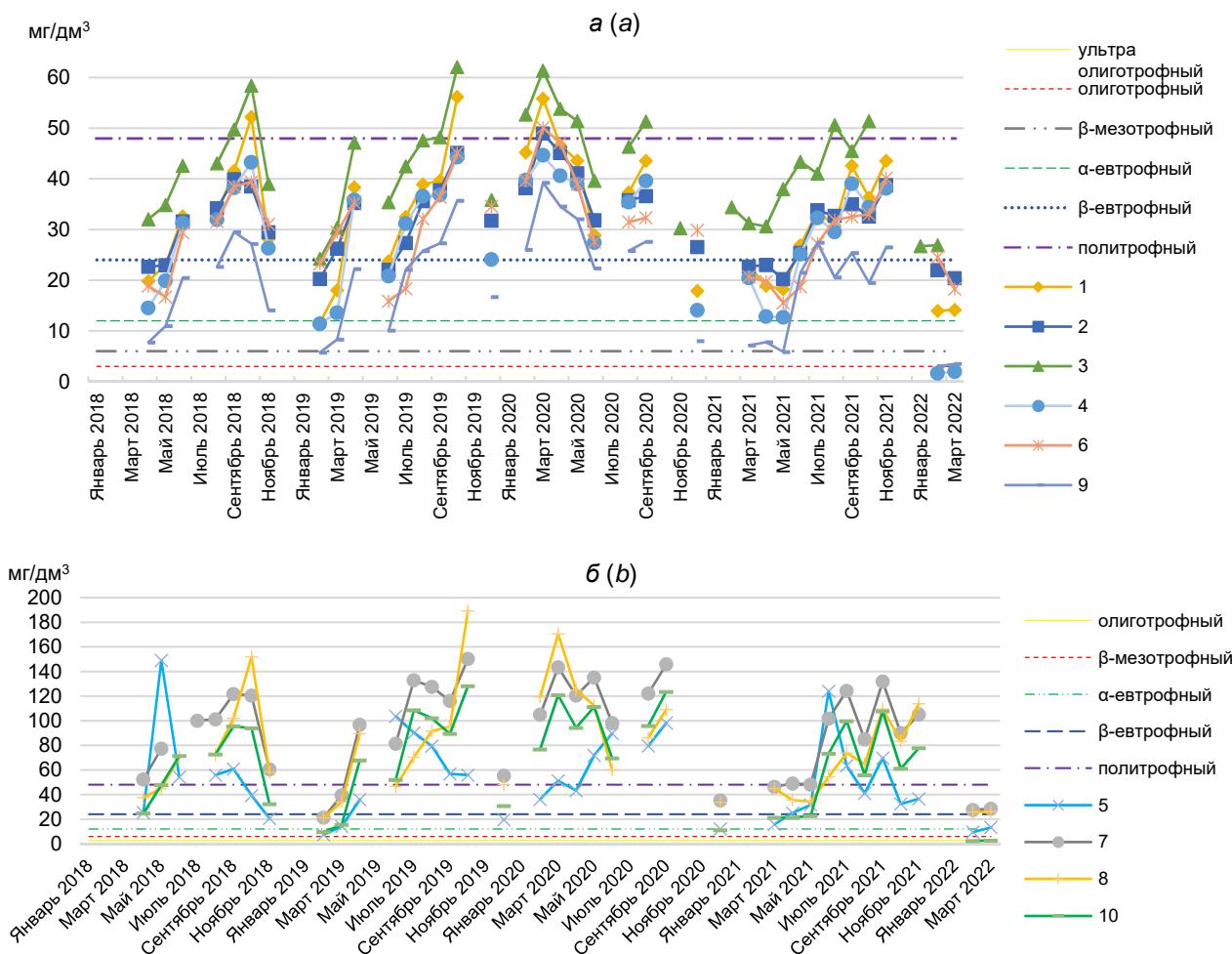


Рис. 3. Многолетняя изменчивость среднемесячных концентраций хлорофилла а:  
а – группа А; б – группа Б; 1–10 – алгоритмы из табл. 1

Fig. 3. Long-term variability of average monthly concentrations of chlorophyll-a:  
a – group A; b – group B; 1–10 – algorithms from table 1

Таким образом, имеет место схожесть характера сезонной изменчивости среднемесячных величин концентрации хлорофилла а в воде р. Припяти, несмотря на отличие уровней величин групп алгоритмов. Для обеих групп соблюдается тенденция к росту/спаду, а также совпадают точки экстремумов.

Внутригодовой характер изменчивости концентрации хлорофилла а имеет схожую динамику для двух групп алгоритмов. Так, для обеих групп наблюдалось снижение концентраций хлорофилла а за период с сентября/октября по декабрь/январь и рост концентрации за период с февраля/марта по сентябрь/октябрь (рис. 4).

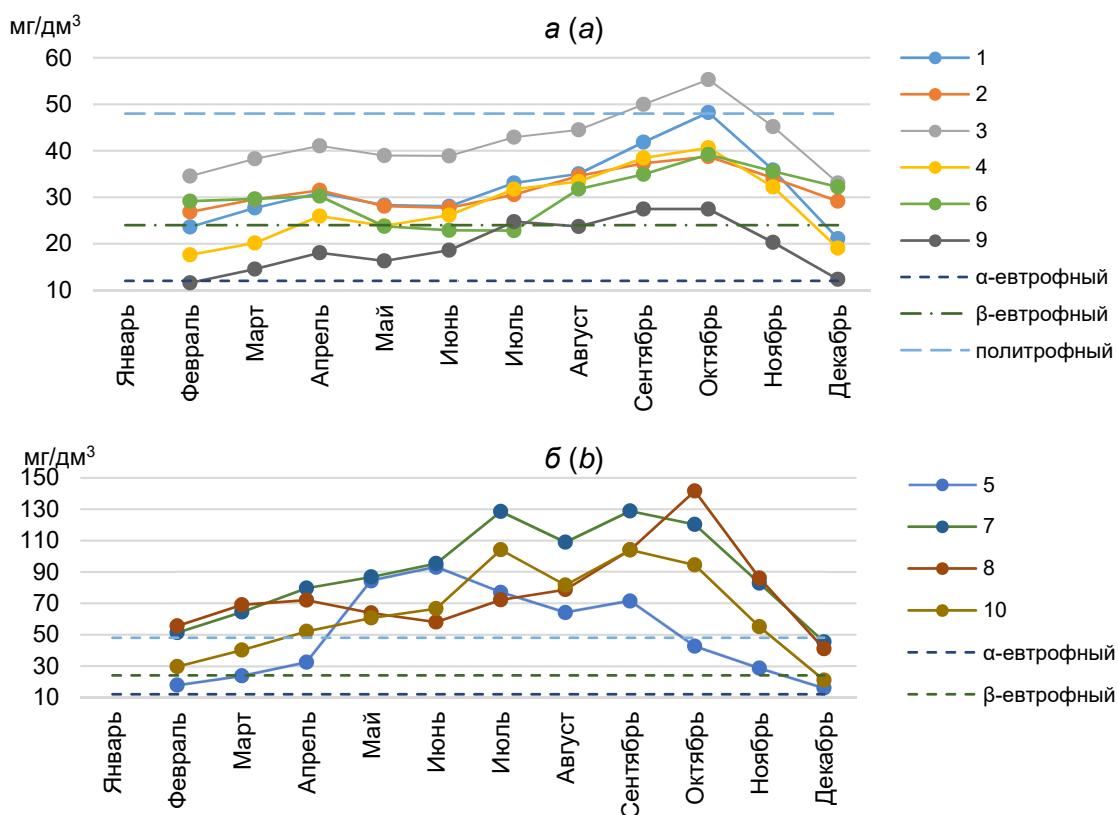


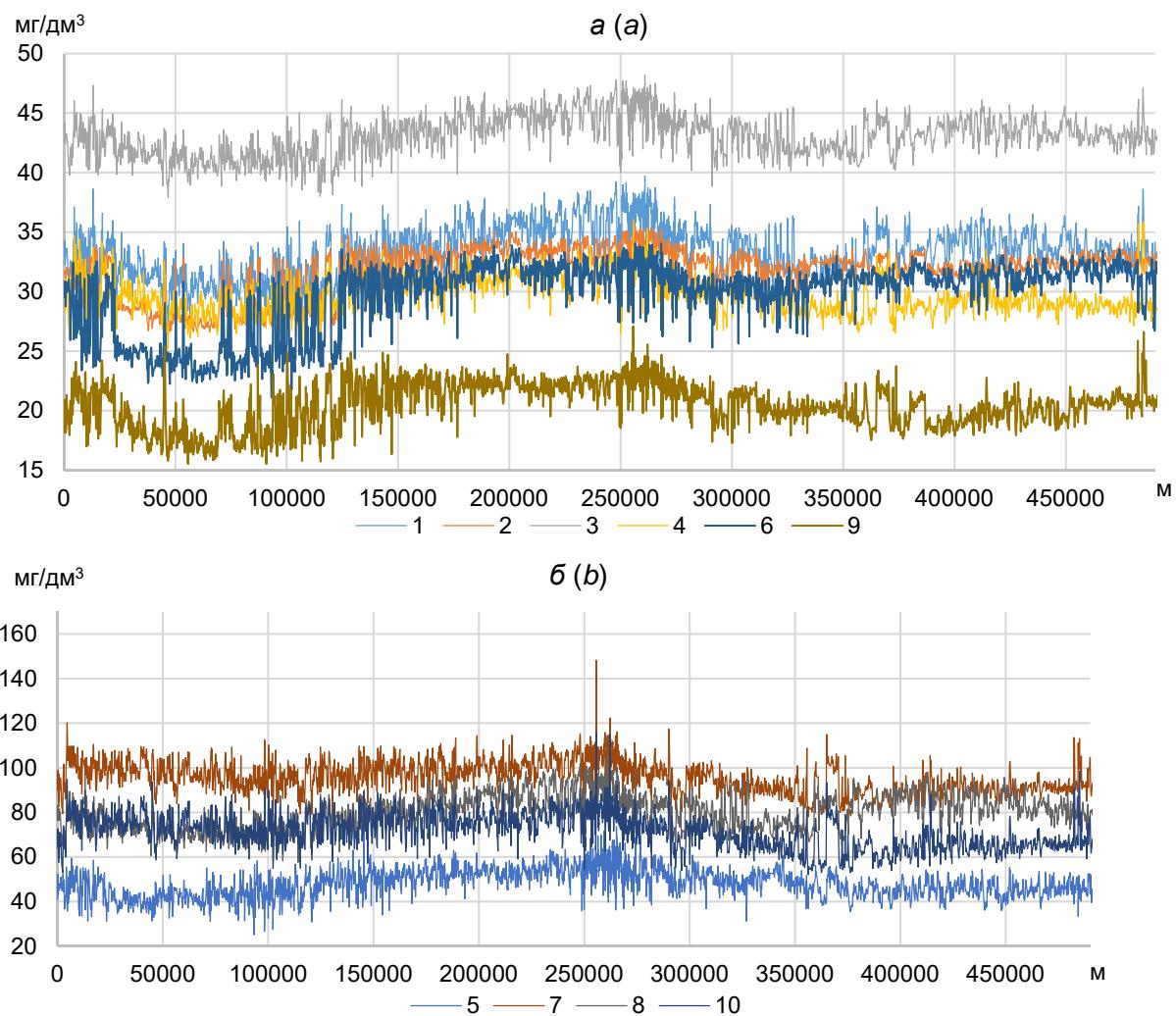
Рис. 4. Внутригодовая изменчивость концентрации хлорофилла а:  
а – группа А; б – группа Б; 1–10 – алгоритмы из табл. 1

Fig. 4. Intra-annual variability of chlorophyll-a concentration:  
a – group A; b – group B; 1–10 – algorithms from table 1

Однако некоторые отличия между группами алгоритмов наблюдаются в интервалах локальных максимумов и минимумов. Для большинства алгоритмов группы А и для некоторых алгоритмов из группы Б пики максимумов содержания хлорофилла а выпали на октябрь. В то же время для алгоритмов группы Б в основном отмечается выпадение пиков максимумов на сентябрь, а также наличие еще одного пика максимума в июле. Некоторой отличительной чертой для алгоритмов группы А является наличие локального минимума, выпадающего на май.

Изменчивость концентрации хлорофилла а по течению р. Припяти для алгоритмов группы А, Б, как и во временной изменчивости, весьма схожа, однако имеются значительные отличия для групп в диапазонах их величин и в размерах амплитуд значений (рис. 5). Для обеих групп алгоритмов в пространственной изменчивости хлорофилла а наблюдалось отсутствие сколько-нибудь значимой величины тренда.

Для оценки влияния притоков на концентрацию хлорофилла а в воде р. Припяти исследовался осредненный многолетний среднемесячный растр октября. Выбор данного месяца обусловлен тем, что в ходе анализа внутригодовой изменчивости концентрации хлорофилла а для большинства алгоритмов пик максимума концентрации хлорофилла а выпал именно на этот месяц (см. рис. 4). Предполагается, что именно в месяц с максимально возможными для р. Припяти и ее притоков концентрациями хлорофилла а будет наиболее явно просматриваться влияние притоков на пространственную изменчивость концентраций хлорофилла а в воде р. Припяти.



**Рис. 5. Изменчивость концентрации хлорофилла а по длине Припяти:**  
а – группа А; б – группа Б; 1–10 – алгоритмы из табл. 1

**Fig. 5. Variability of chlorophyll-a concentration along the length of the Pripyat:**  
a – group A; b – group B; 1–10 – algorithms from table 1

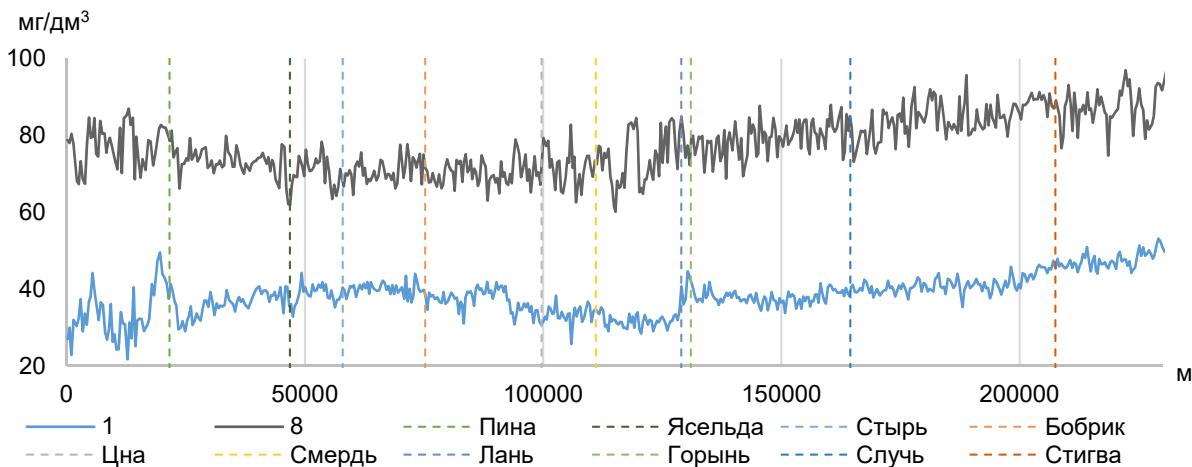
Так как пространственное разрешение используемых снимков составляет 20 м, а длина исследуемого участка реки более 400 км, полученные графики пространственной изменчивости дают очень плотную картину. Для получения менее плотной картины данные пространственной изменчивости хлорофилла а за октябрь обработаны методом окна скользящего среднего, что значительно улучшило визуализацию данных.

Исследование пространственной изменчивости средних многолетних концентраций хлорофилла а в октябре показало несколько совпадений точек впадения притоков в р. Припять с областями локальных максимумов или минимум концентраций хлорофилла а, за которыми следуют противоположные по направлению тенденции изменений концентраций (рис. 6). Вероятно, это и связано с тем, что притоки приносят воды с меньшим или с большим содержанием хлорофилла а, чем в р. Припяти, и таким образом снижают или увеличивают концентрацию хлорофилла в ней. Так как объективных сведений о состоянии вод, рассматриваемых притоков, а также из-за наличия на всем изучаемом протяжении р. Припяти значительного количества локальных максимумов и минимумов концентраций хлорофилла а, можно предполагать случайное попадание точек устьев в пики концентраций. В связи с этим рассмотрение более детальных исследований данного вопроса планируется нами в дальнейших исследованиях.

Во внутригодовом разрезе трофический статус р. Припять для алгоритмов группы А в основном изменяется от α-евтрофного до β-евтрофного с некоторыми выходами в мезотрофную и политрофную области для отдельных алгоритмов (см. рис. 4, а). Для алгоритмов группы Б во внутригодовом разрезе

трофический статус р. Припяти в целом относится к политрофному при изменении от а-евтрофного до политрофного (см. рис. 4, б).

В многолетнем плане изменчивости среднемесячных величин трофический статус р. Припяти для двух групп алгоритмов представлен значениями статуса от олиготрофного до политрофного, при этом чаще всего трофический статус для группы А евтрофный (α и β), а для группы Б – β-евтрофно-политрофный.



**Рис. 6. Изменчивость многолетней среднемесячной концентрации хлорофилла а по длине р. Припяти за октябрь: 1, 8 – алгоритмы из табл. 1**

**Fig. 6. Variability of the long-term average monthly concentration of chlorophyll-a along the length of Pripyat in October; 1, 8 – algorithms from table 1**

Исследования многолетней изменчивости среднегодовых величин концентрации хлорофилла а р. Припяти показали, что алгоритмы группы А по шкале трофического статуса (см. табл. 2) относят р. Припять преимущественно к β-евтрофному типу водного объекта (исключение алгоритм 9 – α-евтрофный), а алгоритмы группы Б – к политрофному типу (табл. 4).

**Таблица 4. Трофический статус р. Припять по алгоритмам**

**Table 4. Trophic status of the Pripyat River by algorithms**

Алго- ритм	2018 г.		2019 г.		2020 г.		2021 г.		Средняя	
	Кон- цен- тра- ция, мг/м³	Трофический статус								
1	33	β-евтр.	31	β-евтр.	40	β-евтр.	30	β-евтр.	32	β-евтр.
2	31	β-евтр.	31	β-евтр.	38	β-евтр.	29	β-евтр.	32	β-евтр.
3	43	β-евтр.	42	β-евтр.	48	политроф.	41	β-евтр.	42	β-евтр.
4	29	β-евтр.	28	β-евтр.	35	β-евтр.	27	β-евтр.	28	β-евтр.
5	58	политроф.	52	политроф.	60	политроф.	49	политроф.	52	политроф.
6	29	β-евтр.	30	β-евтр.	37	β-евтр.	27	β-евтр.	30	β-евтр.
7	91	политроф.	91	политроф.	113	политроф.	87	политроф.	91	политроф.
8	77	политроф.	76	политроф.	102	политроф.	68	политроф.	77	политроф.
9	19	α-евтр.	19	α-евтр.	27	β-евтр.	18	α-евтр.	20	α-евтр.
10	68	политроф.	67	политроф.	88	политроф.	60	политроф.	66	политроф.

В многолетней изменчивости среднегодовых концентраций хлорофилла а для обеих групп алгоритмов выделяется 2020 г. Так, в сравнении с другими рассматриваемыми годами, в 2020 г. отмечены более высокие величины концентраций хлорофилла а, что, в свою очередь, привело для алгоритмов 3 и 9 к изменению трофического статуса р. Припяти. Данное изменение трофности р. Припяти можно объяснить усилением эвтрофикации в 2019–2020 гг., вызванного антропогенными воздействиями. При этом в многолетнем разрезе трофический статус р. Припяти остался неизменным.

Согласно алгоритмам группы А р. Припять можно отнести к евтрофному типу водного объекта, что характеризуется высоким содержанием органических веществ [25] с преобладанием естественной евтрофикации. В то же время согласно алгоритмам группы Б р. Припять можно отнести к политрофному (гипертрофному) типу водного объекта, для которого характерно чрезмерное содержание биогенных веществ антропогенного происхождения. Сделать окончательный вывод о степени евтрофикации р. Припяти антропогенного и естественного происхождения, о направлении и скорости изменения трофности, используя столь короткий период наблюдений, очень затруднительно. Для этого потребуется более продолжительный период наблюдений.

### **Выводы**

Оценка степени евтрофирования Средней и Нижней Припяти за период с апреля 2018 г. по март 2022 г. путем анализа трофического статуса показала следующее.

1. Во внутригодовой изменчивости концентрации хлорофилла а наблюдаются снижение его концентраций за период с сентября/октября по декабрь/январь и рост концентраций за период с февраля/марта по сентябрь/октябрь.

2. Для большинства алгоритмов группы А и некоторых алгоритмов группы Б пики максимумов содержания хлорофилла а выпали на октябрь, тогда как для алгоритмов группы Б – в основном на сентябрь.

3. В колебаниях концентрации хлорофилла а по течению реки статистически значимых трендов выделить не удалось.

4. На пространственную изменчивость концентраций хлорофилла а оказывают влияние притоки.

5. Во внутригодовом разрезе трофический статус р. Припяти по алгоритмам группы А в основном изменяется от α-евтрофного до β-евтрофного, а для группы Б он политрофный.

6. В многолетнем плане изменчивости среднемесячных величин трофический статус р. Припяти в основном по группе А евтрофный, а по группе Б изменяется от β-евтрофного до политрофного.

7. В многолетнем плане изменчивости среднегодовых величин по алгоритмам группы А р. Припять относится преимущественно к β-евтрофному типу водного объекта (исключение алгоритм 9 – α-евтрофный), а для группы Б – к политрофному типу.

8. В многолетнем ходе изменчивости среднегодовых величин выделяется 2020 г. с более высокими величинами концентраций хлорофилла а и отличным для алгоритмов 3 и 9 трофическим статусом р. Припяти.

### **Список использованных источников**

- Неверова-Дзиопак, Е. Оценка трофического состояния поверхностных вод / Е. Неверова-Дзиопак, Л. И. Цветкова. – СПб. : СПбГАСУ, 2020. – 176 с.
- Суховило, Н. Ю. Пространственные закономерности устойчивости озер Беларуси к евтрофированию / Н. Ю. Суховило, А. А. Новик // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 51–65.
- Природа Беларуси : энциклопедия : в 3 т. / редкол.: Т. В. Белова [и др.]. – Минск : Беларус. энцыкл. імя П. Броўкі, 2009–2010. – Т. 2. – 2010. – 504 с.
- Блакітная книга Беларусі : энцыклапедыя / рэдкал.: Н. А. Дзісько [і інш.]. – Мінск : БелЭн, 1994. – 415 с.
- About Copernicus [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>. – Date of access: 20.06.2022.
- Климатические исследования Института природопользования НАН Беларуси / В. Ф. Логинов [и др.] // Природопользование. – 2018. – № 1. – С. 67–86.
- Sentinel Overview [Electronic resource]. – Mode of access: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>. – Date of access: 01.06.2022.
- Choe, E. Monitoring and modelling of chlorophyll-a concentrations in rivers using a high-resolution satellite image: a case study in the Nakdong river, Korea / E. Choe, J. W. Lee, S. U. Cheon // International Journal of Remote Sensing. – 2015. – Vol. 36, № 6. – P. 1645–1660.
- Estimation of chlorophyll-a concentration in estuarine waters: Case study of the Pearl River estuary, South China Sea / Y. Zhang [et al.] // Environ. Res. Lett. – 2011. – Vol. 6, № 2. – P. 1–9.
- Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data-successes and challenges / W. J. Moses [et al.] // Environ. Res. Lett. – 2009. – Vol. 4, № 16. – P. 1–8.
- Regional Models for High-Resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery / A. A. Molkov [et al.] // Remote Sens. – 2019. – Vol. 11, № 10. – P. 1–29.
- Retrieval and mapping of chlorophyll-a concentration from sentinel-2 images in an urban river in the semiarid region of Brazil / A. R. A. Pereira [et al.] // Rev. Ambiente Agua. – 2020. – Vol. 15, № 2. – P. 1–13.
- Grendaitė, D. Chlorophyll-a concentration retrieval in eutrophic lakes in Lithuania from Sentinel-2 data / D. Grendaitė, E. Stonevičius // Geol. Geogr. – 2018. – Vol. 4, № 1. – P. 15–28.

14. The Use of Sentinel-2 for Chlorophyll-a Spatial Dynamics Assessment: A Comparative Study on Different Lakes in Northern Germany / I. Ogashawara [et al.] // *Remote Sens.* – 2021. – Vol. 13, № 8. – P. 1–26.
15. Ansper, A. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes / A. Ansper, K. Alikas // *Remote Sens.* – 2019. – Vol. 11, № 1. – P. 1–26.
16. First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery / K. Toming [et al.] // *Remote Sens.* – 2016. – Vol. 8, № 8. – P. 1–14.
17. Remote estimation of colored dissolved organic matter and chlorophyll-a in Lake Huron using Sentinel-2 measurements / J. Chen [et al.] // *Journal of Applied Remote Sensing.* – 2017. – Vol. 11, № 3. – P. 1–15.
18. Estimation of Phytoplankton Chlorophyll-a Concentrations in the Western Basin of Lake Erie Using Sentinel-2 and Sentinel-3 Data / S. Pirasteh [et al.] // *Canadian Journal of Remote Sensing.* – 2020. – Vol. 46, № 5. – P. 585–602.
19. Calibration and validation of algorithms for the estimation of the chlorophyll-a concentration and Secchi depth in inland waters with Sentinel-2 / M. Pereira-Sandoval [et al.] / *Limnetica.* – 2019. – Vol. 38, № 1. – P. 471–487.
20. Морозова, В. А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования / В. А. Морозова // Современные проблемы территориального развития. – 2019. – № 2. – С. 1–12.
21. Пространственное распределение и сезонная динамика концентрации хлорофилла “а” в Азовском море по данным спутниковых снимков спектрометра MERIS / В. В. Сапрыгин [и др.] // *Океанология.* – 2018. – Т. 58, № 5. – С. 751–762.
22. Китаев, С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов / С. П. Китаев. – Петрозаводск : Наука, 2007. – 395 с.
23. Логинов, В. В. Оценка трофического статуса и гидрохимического состава малых рек Нижегородской области и сопредельных территорий / В. В. Логинов, Т. В. Кривдина, О. А. Морева // Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Нижегородский филиал. – 2021. – № 26. – С. 3–25.
24. Оценка трофности устьевого участка Оки на основании современных абиотических и биотических показателей водных масс / В. В. Логинов [и др.] // *Norwegian Journal of development of the International Science.* – 2021. – № 54. – С. 13–27.
25. Энцыклапедыя прыроды Беларусі : у 5 т. / рэдкал.: І. П. Шамякін [і інш.]. – Мінск : Беларусь. Сав. энцыклапедыя, 1983–1986. – Т. 5. – 1986. – 583 с.

## References

1. Neverova-Dziopak E., Cvetkova L. I. *Ocenka troficheskogo sostojanija poverhnostnyh vod* [Assessment of the trophic state of surface waters]. SPb., 2020, 176 p. (in Russian)
2. Suhovilo N. Ju., Novik A. A. *Prostranstvennye zakonomernosti ustojchivosti ozer Belarusi k jevtrofirovaniju* [Spatial patterns of resistance of lakes of Belarus to eutrophication], *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2019, no. 1, pp. 51–65. (in Russian)
3. Belova T. V. [et al.] (eds.). *Priroda Belarusi: jenciklopedija: v 3 t.* [Nature of Belarus: an encyclopedia: in 3 vol.]. Minsk, 2009–2010, vol. 2, 2010, 504 p. (in Russian)
4. Dzis'ko N. A. [et al.] (eds.). *Blakinaja kniga Belarusi: Jencyklapedyja* [The Blue Book of Belarus: Encyclopedia]. Minsk, 1994, 415 p. (in Belarusian)
5. About Copernicus. Available at: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus> (accessed 20 June 2022).
6. Loginov V. F., Lysenko S. A., Danilovich I. S., Kamysheko G. A., Koljada V. V., Mel'nik V. I., Mikuckij V. S., Tabal'chuk T.G., Hitrikov M. A., Chernyshev V. D. *Klimaticheskie issledovaniya Instituta prirodopol'zovanija NAN Belarusi* [Climatic research of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2018, no. 1, pp. 67–86. (in Russian)
7. Sentinel Overview. Available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions> (accessed 01 June 2022).
8. Choe E., Lee J. W., Cheon S. U. Monitoring and modelling of chlorophyll-a concentrations in rivers using a high-resolution satellite image: a case study in the Nakdong river, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, vol. 36, no. 6, pp. 1645–1660.
9. Zhang Y., Lin H., Chen C., Chen L., Zhang L. B., Gitelson A. A. Estimation of chlorophyll-a concentration in estuarine waters: Case study of the Pearl River estuary, South China Sea. *Environ. Res. Lett.*, 2011, vol. 6, no. 2, pp. 1–9.
10. Moses W. J., Gitelson A. A., Berdnikov S., Povazhnyy V. Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data-successes and challenges. *Environ. Res. Lett.*, 2009, vol. 4, no. 16, pp. 1–8.
11. Molkov A. A., Fedorov S. V., Pelevin V. V., Korchemkina E. N. Regional Models for High-Resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, no. 10, pp. 1–29.
12. Pereira A. R. A., Lopes J. B., de Espindola G. M., da Silva C. E. Retrieval and mapping of chlorophyll-a concentration from sentinel-2 images in an urban river in the semi-arid region of Brazil. *Rev. Ambiente Agua*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 1–13.
13. Grendaitė D., Stonevičius E. Chlorophyll-a concentration retrieval in eutrophic lakes in Lithuania from Sentinel-2 data. *Geol. Geogr.*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 15–28.

14. Ogashawara I., Kiel C., Jechow A., Kohnert K., Ruhtz T., Grossart H. P., Höller F., Nejstgaard J. C., Berger S. A., Wollrab S. The Use of Sentinel-2 for Chlorophyll-a Spatial Dynamics Assessment: A Comparative Study on Different Lakes in Northern Germany. *Remote Sens.*, 2021, vol. 13, no. 8, pp. 1–26.
15. Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 1–26.
16. Toming K., Kutser T., Laas A., Sepp M., Paavel B., Nõges T. First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. *Remote Sens.*, 2016, vol. 8, no. 8, pp. 1–14.
17. Chen J., Zhu W., Tian Y. Q., Yu Q., Zheng Y., Huang L. Remote estimation of colored dissolved organic matter and chlorophyll-a in Lake Huron using Sentinel-2 measurements. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 1–15.
18. Pirasteh S., Mollaee S., Fatholahi S. N., Li J. Estimation of Phytoplankton Chlorophyll-a Concentrations in the Western Basin of Lake Erie Using Sentinel-2 and Sentinel-3 Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2020, vol. 46, no. 5, pp. 585–602.
19. Pereira-Sandoval, M., Urrego, P., Ruiz-Verdú A., Delegido J., Soria J., Perpinyà J., Vicente E., Moreno J. Calibration and validation of algorithms for the estimation of the chlorophyll-a concentration and Secchi depth in inland waters with Sentinel-2. *Limnetica*, 2019, vol. 38, no. 1, pp. 471–487.
20. Morozova V. A. Raschet indeksov dlja vyjavlenija i analiza harakteristik vodnyh ob'ektov s pomoshch'ju dannyh distancionnogo zondirovaniya [Calculation of indices for identification and analysis of characteristics of water bodies using remote sensing data]. *Sovremennye problemy territorial'nogo razvitiya = Modern problems of territorial development*, 2019, vol. 2, pp. 1–12. (in Russian)
21. Saprygin V. V., Berdnikov S. V., Kulygin V. V., Dashkevich L. V., Mesteckij L. M. *Prostranstvennoe raspredelenie i sezonnaja dinamika koncentracii hlorofilla "a" v Azovskom more po dannym sputnikovyh snimkov spektrometra MERIS* [Spatial distribution and seasonal dynamics of chlorophyll "a" concentration in the Sea of Azov according to satellite images of the MERIS spectrometer]. *Okeanologija = Oceanology*, 2018, vol. 58, no. 5, pp. 751–762. (in Russian)
22. Kitaev S. P. *Osnovy limnologii dlja gidrobiologov i ihtiologov* [Basics of limnology for hydrobiologists and ichthyologists]. Petrozavodsk, 2007, 395 p. (in Russian)
23. Loginov V. V., Krivdina T. V., Moreva O. A. *Ocenka troficheskogo statusa i hidrohimicheskogo sostava malyh rek Nizhegorodskoj oblasti i sopredel'nyh territorij* [Assessment of trophic status and hydrochemical composition of small rivers of the Nizhny Novgorod region and adjacent territories]. *Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut rybnogo hozajstva i okeanografii, Nizhegorodskij filial*, 2021, no. 26, pp. 3–25. (in Russian)
24. Loginov V. V., Minina L. M., Krivdina T. V., Vodeneeva E. L., Lavrova T. V., Mushkova D. V. *Ocenka trofnosti ust'evogo uchastka Oki na osnovanii sovremennoy abioticheskikh i bioticheskikh pokazatelej vodnyh mass* [Evaluation of the trophicity of the mouth section of the Oka on the basis of modern abiotic and biotic indicators of water masses]. *Norwegian Journal of development of the International Science*, 2021, no. 54, pp. 13–27. (in Russian)
25. Shamjakin I. P. [et al.] (eds.). *Jencyklaedija pryrody Belarusi: u 5 t.* [Encyclopedia of nature of Belarus: in 5 vol.]. Minsk, Belarus, 1983–1986, vol. 5, 1986, 583 p. (in Belarussian)

### Информация об авторах

**Волчек Александр Александрович** – доктор географических наук (Российской Федерации и Республики Беларусь), профессор, декан факультета инженерных систем и экологии, Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: Volchak@tut.by

**Шешко Николай Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры природообустройства, Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: optimum@tut.by

**Кухаревич Михаил Федорович** – магистр технических наук, аспирант кафедры природообустройства, Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: kukharevichmikhail@gmail.com

### Information about the authors

**Aliaksandr A. Volchak** – D. Sc. (Geographical), Professor, Dean of the Faculty of Engineering Systems and Ecology, Brest State Technical University (Moskovskaya Str., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: Volchak@tut.by

**Nikolay N. Sheshko** – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Environmental Management, Brest State Technical University (Moskovskaya Str., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: optimum@tut.by

**Mikhail F. Kukharevich** – Master of Technical Sciences, postgraduate student of the Department of Environmental Management, Brest State Technical University (Moskovskaya Str., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: kukharevichmikhail@gmail.com

## ТRENДЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ В ГОРОДАХ БЕЛАРУСИ

В. С. Хомич<sup>1</sup>, В. В. Парфенов<sup>2</sup>, С. В. Савченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь;

<sup>2</sup>Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, Минск, Беларусь

**Аннотация.** Представлены результаты анализа современного состояния и динамики концентраций тяжелых металлов и нефтепродуктов в почвах городов Беларуси за период с 1990–1995 по 2016–2021 гг. В его основу положены данные мониторинга почв в городах Беларуси в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь и результаты детальной почвенно-геохимической съемки г. Минска, выполненной авторами в 1990 г. Оценка динамики содержания химических веществ в почвах городов осуществлялась несколькими способами: сравнением их средних концентраций для отдельных городов за рассматриваемый период; сравнением концентраций химических веществ в пробах почв отобранных на одних и тех же пробных площадках на территории г. Минска за почти 30-летний период. Установлено, что для большинства городов наблюдается тенденция накопления в почвенном покрове цинка и нефтепродуктов. В 46 % городов имеет место снижение содержания свинца в почве, против 19 %, в которых наблюдается повышение его концентрации. Сходная со свинцом динамика характерна для меди. Показано, что ежегодное увеличение в почвах г. Минска содержания цинка составляет в среднем 0,57 мг/кг в год и, наоборот, снижение содержания свинца – на 0,22 мг/кг в год.

**Ключевые слова:** почвы городов; тяжелые металлы; нефтепродукты; динамика загрязнения; Беларусь.

**Для цитирования.** Хомич В. С., Парфенов В. В., Савченко С. В. Тренды загрязнения почв тяжелыми металлами и нефтепродуктами в городах Беларуси // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 112–121.

## TRENDS OF SOIL CONTAMINATION WITH HEAVY METALS AND OIL PRODUCTS IN THE CITIES OF BELARUS

V. S. Khomich<sup>1</sup>, V. V. Parfenov<sup>2</sup>, S. V. Savchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

<sup>2</sup>Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring, Minsk, Belarus

**Abstract.** The results of the analysis of the current state and dynamics of concentrations of heavy metals and oil products in the soils of Belarusian cities for the period from 1990–1995 to 2016–2021 are presented. It is based on the soil monitoring data in the cities of Belarus within the framework of the National Environmental Monitoring System in the Republic of Belarus and the results of a detailed soil-geochemical survey of the city of Minsk, carried out by the authors in 1990. The dynamics of the content of chemicals in the soils of cities was assessed by comparing the average concentrations for individual cities over the period under review and with comparison of the concentrations of chemicals in soil samples taken at the same sampling sites in the city of Minsk over a nearly 30-year period. It has been established that for most cities there is a tendency to accumulate zinc and oil products in the soil cover. There is a decrease in the content of lead in the soil in 46 % of cities and an increase in its concentration in 19 % of cities are observed. Similar to lead dynamic is typical for copper content in urban soils. It is shown that the annual average increase in the content of zinc in the soils of Minsk is 0.57 mg/kg per year, while the annual average decrease in the content of lead is 0.22 mg/kg per year.

**Keywords:** urban soils; heavy metals; oil products; contamination dynamics; Belarus.

**For citation.** Khomich V. S., Parfenov V. V., Savchenko S. V. Trends of soil contamination with heavy metals and oil products in the cities of Belarus. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 112–121.

**Введение.** Несмотря на принимаемые меры на международном и страновом уровнях, проблема загрязнения почв сохраняет свою актуальность. Это связано как с продолжающимся выделением в окружающую среду загрязняющих веществ с выбросами, стоками и отходами, хотя и в меньших объемах, чем это было 20–30 лет назад, так и свойством почв депонировать различные органические и неорганические вещества природного и техногенного происхождения. В научной литературе имеется обширный материал по накоплению загрязняющих веществ в почвах городов в целом, в различных

функциональных зонах и в зонах импактного воздействия. Анализируются факторы, обуславливающие поведение, латеральное и радиальное распределение загрязняющих веществ в городских почвах. Вместе с тем публикации в научной литературе, посвященные временным изменениям загрязнения городских почв, немногочисленны [9]. Сведения о динамике загрязнения почв в городах за предшествующие 5–10 лет приводятся в обзорных материалах по результатам мониторинга земель (почв) в Беларуси, России и других странах [4, 8 и др.].

Вместе с тем для целей прогнозирования состояния природной среды, в том числе почв, а также градостроительного проектирования, связанного с реконструкций городской инфраструктуры, размещением и строительством новых объектов, требуются выявление динамики и ретроспективный анализ трендов состояния городских почв, с тем чтобы предупредить возможные негативные последствия, обусловленные загрязнением почв опасными химическими веществами.

Цель работы – оценить многолетние изменения и выявить тренды в содержании тяжелых металлов и нефтепродуктов в почвах городов Беларуси.

**Методика и используемые данные.** В основу работы положены данные мониторинга почв городов Беларуси, полученные в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь (НСМОС), результаты наблюдений за загрязнением почв в городах, выполненных в 1990-е гг. Республиканским центром радиационного контроля и мониторинга окружающей среды, материалы детальной почвенно-геохимической съемки г. Минска, выполненной авторами в 1990 г. [10]. Использование более ранних исследований загрязнения почв городов, как например, В. К. Лукашева и Л. Н. Окунь [6], затруднительно из-за применения для определения в почвах химических веществ эмиссионного спектрального анализа. Используемые в настоящей статье данные по содержанию тяжелых металлов (ТМ) в почвах получены с использованием атомно-абсорбционного метода анализа.

Для оценки динамики содержания ТМ в городских почвах применены несколько подходов:

- 1) сравнение средних концентраций химических веществ для отдельных городов, исследованных в 1990–1995 и 2016–2021 гг.;
- 2) сравнение концентраций химических веществ в пробах почв, отобранных на одних и тех же пробных площадках на территории г. Минска за почти 30-летний период. Для этого использованы данные по 53 пробным площадкам мониторинга почв в городе за 2012–2013 и 2018–2019 гг., а также результаты почвенно-геохимической съемки г. Минска 1990 г. применительно к указанным 53 пробным площадкам, приуроченным к сети отбора 1990 г. [10];
- 3) оценка трендов в изменении содержания химических веществ в почвах по данным НСМОС за весь период наблюдений для 26 городов, в которых мониторинг загрязнения почв проводился не менее чем в 4 тура, а временной лаг составлял не менее 20 лет.

Наблюдения за химическим загрязнением земель в городах Беларуси в рамках НСМОС осуществляются согласно [5]. Периодичность наблюдений в настоящее время составляет 1 раз в 5 лет. Ранее до 2015 г. обследование почв проводилось 1 раз в 4 года. Для городов пункты наблюдений имеют размер 100 м × 100 м и располагаются по ортогональной сетке со сторонами ячеек, кратных 1 км, и площадью ячеек не более 4 км<sup>2</sup>; при этом центры пунктов наблюдений находятся в точках пересечения диагоналей каждой ячейки. В каждой функциональной зоне должно располагаться не менее трех пунктов наблюдений.

Для выявления тенденций в изменении содержания ТМ и нефтепродуктов в почвах городов со-поставлены их средние концентрации в последний тур обследования (2016–2021 гг.) с начальным периодом наблюдений (1990–1995 гг.). На основании сравнения все города для каждого загрязняющего вещества разделены на пять групп: с отсутствием динамики содержания загрязняющего вещества в почве (различие концентраций менее чем в 1,2 раза), с незначительным увеличением/уменьшением содержания загрязняющего вещества (различие концентраций от 1,2 до 1,5 раза), со значительным (более 1,5 раза) увеличением/уменьшением содержания загрязняющего вещества в почве.

При оценке изменений среднего содержания химических веществ в почвах городов необходимо учитывать повторность отбора проб на одних и тех же пробных площадках. При мониторинге почв в рамках НСМОС в большинстве городов это условие соблюдается, свидетельством чему служит одинаковое количество пробных площадок в разные периоды опробования. В ряде городов данное условие не соблюдено, что, возможно, привело к некоторому завышению или занижению средних концентраций химических веществ в почвах этих городов и сказалось на оценке динамики загрязнения.

#### **Результаты и их обсуждение.**

**Современное состояние химического загрязнения почв в городах Беларуси.** Уровень загрязнения почв городов Беларуси характеризуется высокой контрастностью, о чем свидетельствует широкий диапазон средних концентраций ТМ и нефтепродуктов в почвах городов Беларуси: от минимальных значений, близких к фоновым, до высоких, в десятки раз превышающих фоновые и в ряде случаев – гигиенические нормативы (табл. 1).

**Таблица 1. Среднее содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов в почвах городов Беларуси (по данным НСМОС), 2016–2021 гг., мг/кг**

**Table 1. Average content of heavy metals and petroleum products in the soils of Belarusian cities (according to the NSMOS), 2016–2021, mg/kg**

Город	Год(ы)	Количество проб	Cd	Zn	Pb	Cu	Ni	Нефте-продукты
Барановичи	2018	30	0,13	30,6	13,5	7,4	5,9	44,0
Березовка	2018	15	0,17	30,5	21,8	4,7	2,8	38,2
Бобруйск	2019	50	0,37	38,8	23,4	6,7	4,0	101,5
Борисов	2017	29	0,18	68,3	24,4	12,2	9,3	93,8
Брест	2017	50	0,14	39,7	12,7	8,8	6,3	63,5
Витебск	2016	50	0,37	89,4	24,6	10,0	5,5	
Волковыск	2019	25	0,14	35,5	14,9	7,5	5,0	29,8
Гомель	2021	40	0,25	37,7	45,1	12,5	20,7	71,3
Гродно	2017	50	0,24	24,5	13,6	5,9	4,5	71,1
Жлобин	2019	30	0,14	26,7	8,1	3,6	4,4	39,2
Жодино	2020	25	0,07	32,5	7,4	13,2	3,6	62,7
Калинковичи	2017	15	0,18	28,9	22,1	10,5	3,1	126,6
Кобрин	2019	23	0,12	14,9	7,6	6,0	4,5	100,7
Костюковичи	2017	25	0,49	35,5	7,0	5,9	4,2	65,5
Кричев	2018	29	—	55,6	14,0	8,5	7,1	85,1
Лида	2017	35	0,11	33,9	18,6	8,0	6,0	71,5
Лунинец	2019	24	0,09	21,3	12,4	7,1	3,5	41,3
Минск	2018–2019	100	0,18	51,8	16,5	12,9	6,5	112,7
Могилёв	2020	60	0,12	42,9	19,3	9,6	3,9	84,6
Мозырь	2018	31	0,12	19,4	8,1	6,0	4,6	70,4
Молодечно	2021	40	0,24	39,7	10,4	8,4	5,3	114,5
Новополоцк	2021	30	0,07	33,2	7,8	5,3	5,0	90,0
Орша	2021	35	0,13	49,2	17,1	14,8	5,7	70,3
Пинск	2017	35	0,12	50,2	11,2	7,9	4,9	126,5
Полоцк	2020	30	0,12	16,1	12,7	5,9	4,1	78,0
Речица	2020	30	0,11	22,1	10,0	5,0	4,3	52,4
Светлогорск	2017	20	0,17	21,1	7,8	6,4	3,5	81,1
Слоним	2021	21	0,14	53,9	19,4	8,3	1,0	66,4
Слуцк	2021	20	0,14	52,2	10,8	9,3	5,7	60,7
Солигорск	2018	20	0,15	18,7	6,9	4,4	4,0	79,3
Региональный фонд [8]	2015–2020	100	0,11	14,3	5,1	3,9	3,1	20,8
ПДК (ОДК) [2]		0,5/1,0/2,0	55/110/220	32	33/66/132	20/40/80	50/100	

**П р и м е ч а н и я.**

1. ПДК – предельно допустимая концентрация; ОДК – ориентировочная допустимая концентрация.
2. Значения средних концентраций химических веществ, превышающие фоновые в 2 раза и более, выделены курсивным шрифтом, а превышающие гигиенические нормативы – полужирным шрифтом.

По данным НСМОС, максимальная выявленная концентрация кадмия в городских почвах за последний тур обследования (2016–2021 гг.) составила 2,25 мг/кг (в 6,1 раза выше фона, или 4,5 ОДК), цинка – 1472,2 (75,1 раза, или 26,7 ОДК), свинца – 262,5 (32,0 раза, или 8,2 ПДК), меди – 106,9 (21,4 раза, или 3,2 ОДК), никеля – 49,9 (10,4 раза, или 2,5 ОДК), нефтепродуктов – 14 043,3 мг/кг (в 407 раз выше фона, или 140,4 ПДК).

В почвах г. Минска, согласно последнему туре наблюдений в рамках НСМОС (2018–2019 гг., 100 пробных площадок), содержание кадмия составляет в среднем 0,18 мг/кг, цинка – 51,8, свинца – 16,5, меди – 13,0, никеля – 6,6, нефтепродуктов – 114,0 мг/кг. При этом средняя концентрация нефтепродуктов в почвах г. Минска выше гигиенического норматива в 1,1 раза. Следует отметить, что загрязнение почв нефтепродуктами и цинком выше допустимого уровня фиксируется в трети проб, отобранных на территории города. Превышение допустимых концентраций свинца отмечается в 9 % проб, меди – в 6 %. Это свидетельствует о том, что на более чем третьей части территории города почвы загрязнены выше допустимого уровня (не учитывая промплощадок предприятий).

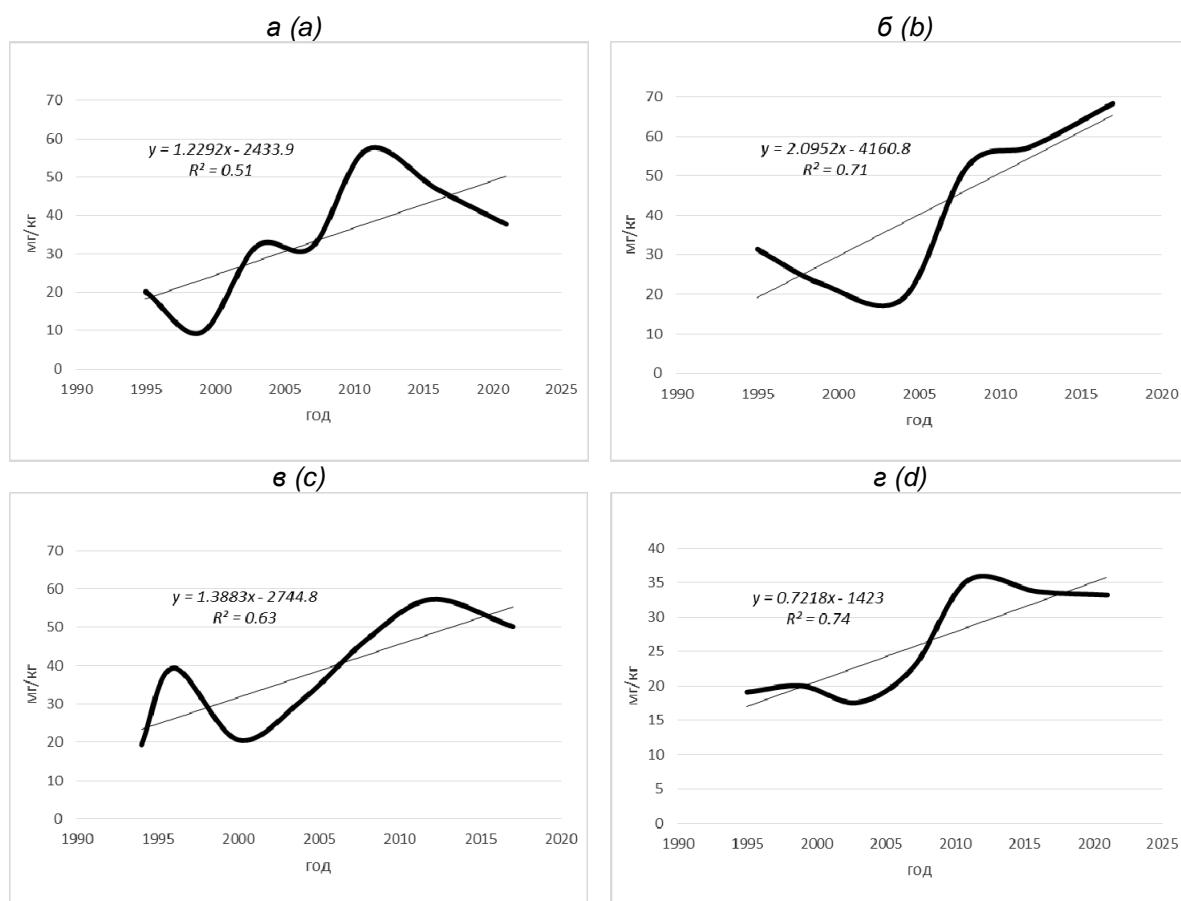
Последний тур обследования почв городов в рамках НСМОС показал высокую долю загрязненных проб выше гигиенических нормативов также в городах Борисове (по цинку – 72,4 % проб, нефте-

продуктам – 31, свинцу – 24,1 %), Костюковичах (по кадмию – 56 %, цинку – 8 %), Бобруйске (по кадмию – 55,6 %, нефтепродуктам – 36,0, цинку – 23,9, свинцу – 23,4 %), Гомеле (по свинцу – 45 %, нефтепродуктам – 25, никелю – 27,5 %), Пинске (по цинку – 48,6 %, нефтепродуктам – 27,6 %), Кричеве (по цинку – 44,8 %, нефтепродуктам – 27,6 %), Слуцке (по цинку – 40 %), Слониме (по свинцу и цинку – 23,8 %, нефтепродуктам – 67,5 %). Следует также отметить высокую долю проб почв, загрязненных нефтепродуктами выше гигиенического норматива, в Кобрине – 52,2 % проб, Калинковичах – 33,3, Светлогорске – 30,0, Новополоцке – 26,7, Гродно – 26,0, Лиде – 25,7 и Могилёве – 25 % проб.

Педогеохимические аномалии с высоким содержанием цинка и свинца, превышающим гигиенические нормативы, чаще всего приурочены к центральным частям городов, промышленно-складским зонам, а также приусадебным участкам в пределах старой индивидуальной застройки [3, 7]. Почвы приусадебных участков часто загрязнены также нитратами и нефтепродуктами. Источниками загрязнения являются выбросы автотранспорта, использование мелиорантов и средств защиты растений, захоронение и сжигание бытовых отходов, печная зола, использование в прошлом свинецсодержащих красок и эмалей. При широком распространении загрязнения почв нефтепродуктами ореолы с высокими их концентрациями сформировались вокруг старых нефтехранилищ и автозаправочных станций, на промплощадках предприятий, в местах размещения гаражей, хранилищ коммунальных и производственных отходов и др. [11].

#### **Оценка динамики содержания химических веществ в почвах городов.**

**Цинк.** Анализ динамики содержания цинка в почвах городов позволил выявить тенденцию значительного увеличения (в 1,5 раза и более) его среднего содержания в городах Гомеле, Борисове, Пинске и Новополоцке (рис. 1).



**Рис. 1. Тренды в изменении содержания цинка в почвах городов:**  
а – Гомеля; б – Борисова; в – Пинска; г – Новополоцка

**Fig. 1. Trends in changes in zinc content in soils of cities:**  
a – Gomel; b – Borisov; c – Pinsk; d – Novopolotsk

Кроме того, за последние 20–25 лет концентрация цинка в почвах городов Витебска, Жодино, Кричева, Минска, Молодечно, Новополоцка, Слонима, Слуцка возросла в 1,5 раза и более. Как следует из табл. 2, тенденция увеличения содержания цинка в почвах характерна для более чем половины (54 %) рассматриваемых городов Беларуси. Причем в подавляющем большинстве из них увеличение концентраций цинка в почве значительное – более 1,5 раза. Незначительное увеличение содержания цинка в почве за рассматриваемый период произошло в Барановичах, Бресте и Орше. Напротив, тенденция снижения содержания цинка в почве имеет место только в трех из рассматриваемых городов – Гродно, Полоцке и Солигорске.

**Таблица 2. Градация городов Беларуси по тенденциям в изменении содержания тяжелых металлов и нефтепродуктов в городских почвах**

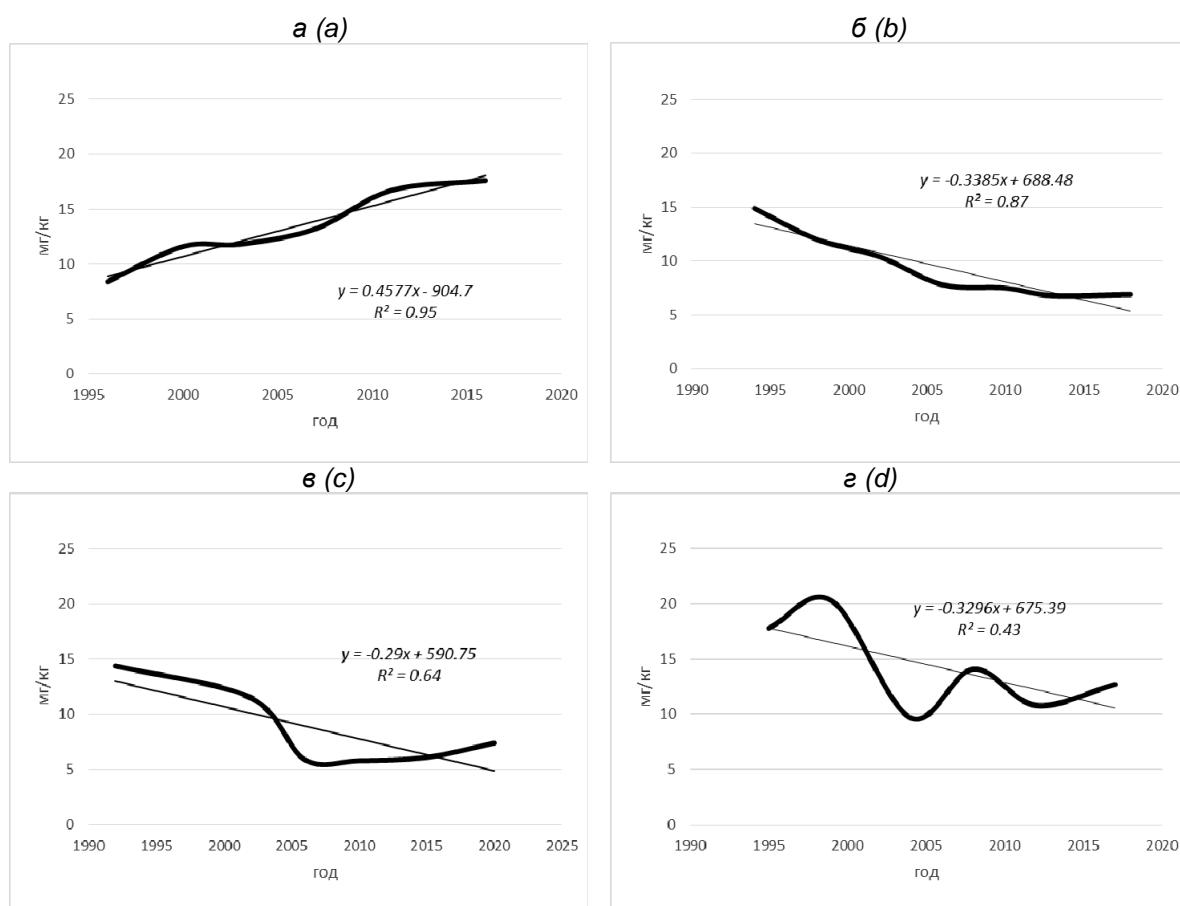
**Table 2. Gradation of Belarusian cities by trends in changes in the content of heavy metals and petroleum products in urban soils**

Химическое вещество	Увеличение содержания		Динамика отсутствует (различия в содержании менее чем в 1,2 раза)	Снижение содержания	
	значительное (более чем в 1,5 раза)	незначительное (в 1,2–1,5 раза)		незначительное (в 1,2–1,5 раза)	значительное (более чем в 1,5 раза)
Цинк	<b>Борисов, Витебск, Гомель, Жодино, Кричев, Минск, Молодечно, Новополоцк, Пинск, Слоним, Слуцк</b>	<b>Барановичи, Брест, Орша</b>	Бобруйск, Волковыск, Калинковичи, Кобрин, Лида, Лунинец, Могилёв, Речица, Светлогорск	<b>Полоцк, Солигорск</b>	<b>Гродно</b>
Свинец	<b>Витебск, Могилёв</b>	<b>Кричев, Лида, Слуцк</b>	Барановичи, Бобруйск, <b>Гомель</b> , Жодино, Калинковичи, Орша, Речица, Слоним, Пинск, Полоцк	<b>Волковыск, Минск, Молодечно, Светлогорск</b>	<b>Борисов, Брест, Гродно, Солигорск, Кобрин, Лунинец, Новополоцк</b>
Медь	<b>Витебск</b>	<b>Гомель, Борисов, Молодечно, Орша</b>	Барановичи, Жодино, Калинковичи, Кричев, Минск, Могилёв, Светлогорск, Слоним, Слуцк	<b>Брест, Волковыск, Кобрин, Лида, Лунинец, Полоцк, Речица</b>	<b>Бобруйск, Гродно, Новополоцк, Пинск, Солигорск</b>
Никель	–	<b>Борисов, Лунинец</b>	Витебск, Волковыск, <b>Гомель</b> , Кричев, Могилев, Молодечно, Орша, Слуцк	<b>Барановичи, Бобруйск, Брест, Лида, Минск, Новополоцк, Пинск, Полоцк, Речица</b>	<b>Гродно, Жодино, Калинковичи, Кобрин, Светлогорск, Слоним, Солигорск</b>
Нефте-продукты	<b>Барановичи, Борисов, Брест, Витебск, Калинковичи, Кобрин, Лида, Могилёв, Молодечно, Новополоцк, Пинск, Полоцк, Светлогорск</b>	<b>Бобруйск, Гомель, Кричев, Орша, Речица</b>	Гродно, Лунинец, Слоним, Слуцк	<b>Волковыск, Солигорск</b>	<b>Жодино</b>

П р и м е ч а н и е. Города, в которых среднее содержание химического вещества в почвах города в последнем туре обследования (2016–2021 гг.) было выше гигиенического норматива, выделены полужирным курсивным шрифтом, а города, в которых в последнем туре обследования были зафиксированы превышения гигиенических нормативов не менее чем на одной пробной площадке, – курсивным шрифтом.

Можно предположить, что в перспективе увеличение уровней загрязнения почв цинком в городах Беларуси сохранится. Этому будет способствовать, прежде всего, увеличение использования в городском хозяйстве и строительных конструкциях технологий оцинкования металлоконструкций. Согласно [12], приблизительная скорость атмосферной коррозии цинка в городской среде составляет 0,05 мм/год. Кроме того, значительным источником поступления цинка в окружающую среду, включая почвы, являются использование и рассеяние при строительных и ремонтных работах, сносе зданий и сооружений цемента, содержание цинка в котором в 10–12 раз выше, чем в городской почве [1].

**Свинец.** Оценка изменения содержания свинца свидетельствует о том, что для 42 % исследованных населенных пунктов наблюдается тенденция снижения его содержания в почвенном покрове (см. табл. 1; рис. 2). При этом в семи городах (Борисове, Бресте, Гродно, Солигорске, Кобрине, Лунинце, Новополоцке) снижение концентрации металла выражено значительно – более чем в 1,5 раза, в четырех (Волковыске, Минске, Молодечно, Светлогорске) – незначительно (в 1,2–1,5 раза).



**Рис. 2. Тренды в изменении содержания свинца в почвах городов:**  
а – Могилёва; б – Солигорска; в – Жодино; г – Бреста

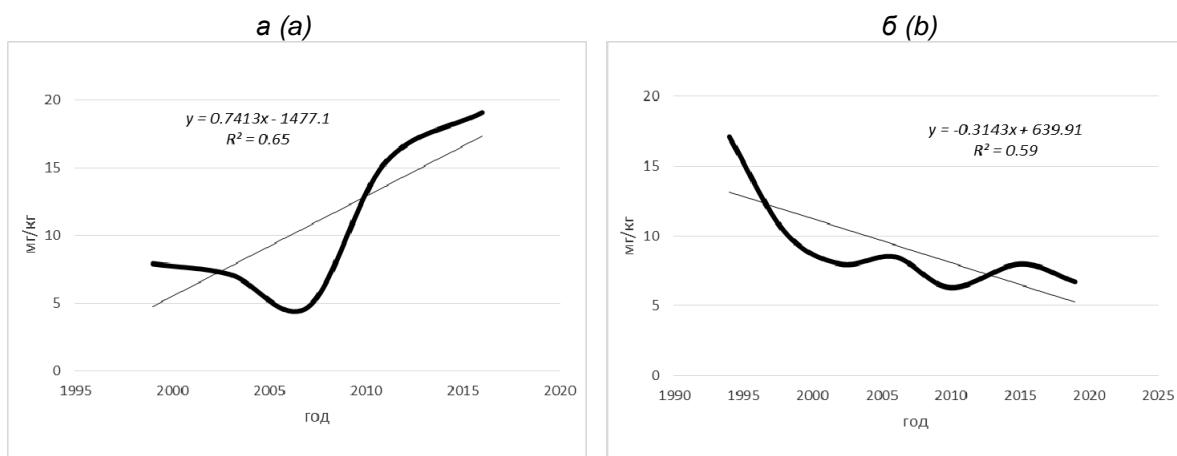
**Fig. 2. Trends in changes in lead content in soils of cities:**  
a – Mogilev; b – Soligorsk; c – Zhodino; d – Brest

Увеличение содержания свинца в почве зафиксировано в пяти (19 %) городах, из них значительное увеличение – в почвах Витебска и Могилёва, незначительное – в почвах Кричева, Лиды и Слуцка. В десяти городах (38 %) содержание свинца в почвах за 27–30-летний период существенно не изменилось.

Как известно, до середины 1990-х гг. основным источником накопления свинца в городских почвах являлось использование этилированного бензина. За последующие 25 лет часть свинца мигрировала из почвы с латеральными и радиальными водными потоками, часть рассеялась при строительстве, прокладке коммуникаций, благоустройстве территорий. Учитывая сложившуюся тенденцию уменьшения содержания свинца в почвах большинства городов и снижения техногенных химических нагрузок на почвы, следует ожидать в долгосрочной перспективе дальнейшего снижения

содержания свинца в почвах городов. В то же время в промышленных зонах, особенно при наличии металлургических и машиностроительных производств, аккумуляторных производств, уровни загрязнения почв свинцом будут постепенно возрастать.

**Медь.** Анализ изменений содержания меди в почвах городов Беларуси показал сходное со свинцом соотношение числа городов с различными тенденциями в изменении его содержания: уменьшение содержания меди зафиксировано в 44 % городов, при этом в пяти городах (Бобруйске, Гродно, Новополоцке, Пинске, Солигорске) значительное – более чем в 1,5 раза. Увеличение содержания меди в почвах произошло – в пяти (19 %) городах, в том числе значительное – в Витебске, незначительное – в Гомеле, Борисове, Молодечно, Орше. Для более чем трети городов (38 %) изменения содержания меди в почвах несущественны (см. табл. 2). Разнонаправленные тренды изменения содержания меди в почвах городов Витебска и Бобруйска показаны на рис. 3.



**Рис. 3. Тренды в изменении содержания меди в почвах городов:**  
а – Витебска; б – Бобруйска

**Fig. 3. Trends in the change of copper content in the soils of cities:**  
a – Vitebsk; b – Bobruisk

**Никель.** Из анализируемых ТМ в отношении динамики их содержания в почвах городов наиболее благоприятная ситуация сложилась по никелю: в большинстве городов (58 %) концентрация металла в почве имеет тенденцию к снижению. При этом в семи городах (Гродно, Жодино, Калинковичах, Кобрине, Светлогорске, Слониме, Солигорске) за рассматриваемый период концентрация никеля в почве снизилась более чем в 1,5 раза, еще в девяти городах – в 1,2–1,5 раза. Увеличение концентрации никеля в почве характерно только для двух городов (Борисова и Лунинца) – в 1,2–1,5 раза. В 35 % городов изменения в содержании никеля за рассматриваемый период несущественны.

**Нефтепродукты.** Оценка динамики содержания нефтепродуктов в почвах показала, что для большинства городов (69 %) наблюдается тенденция увеличения их содержания в почвенном покрове. При этом в тринадцати городах (Барановичах, Борисове, Бресте, Витебске, Калинковичах, Кобрине, Лиде, Могилёве, Молодечно, Новополоцке, Пинске, Полоцке, Светлогорске) содержание нефтепродуктов в почвах увеличилось более чем в 1,5 раза. Уменьшение содержания нефтепродуктов в почвах за рассматриваемый период произошло только в трех городах – Жодино, Волковыске, Солигорске.

В перспективе выявленный положительный тренд в увеличении содержания нефтепродуктов в почвах городов сохранится, поскольку основной источник выбросов нефтепродуктов – автотранспорт получит дальнейшее развитие (рис. 4).

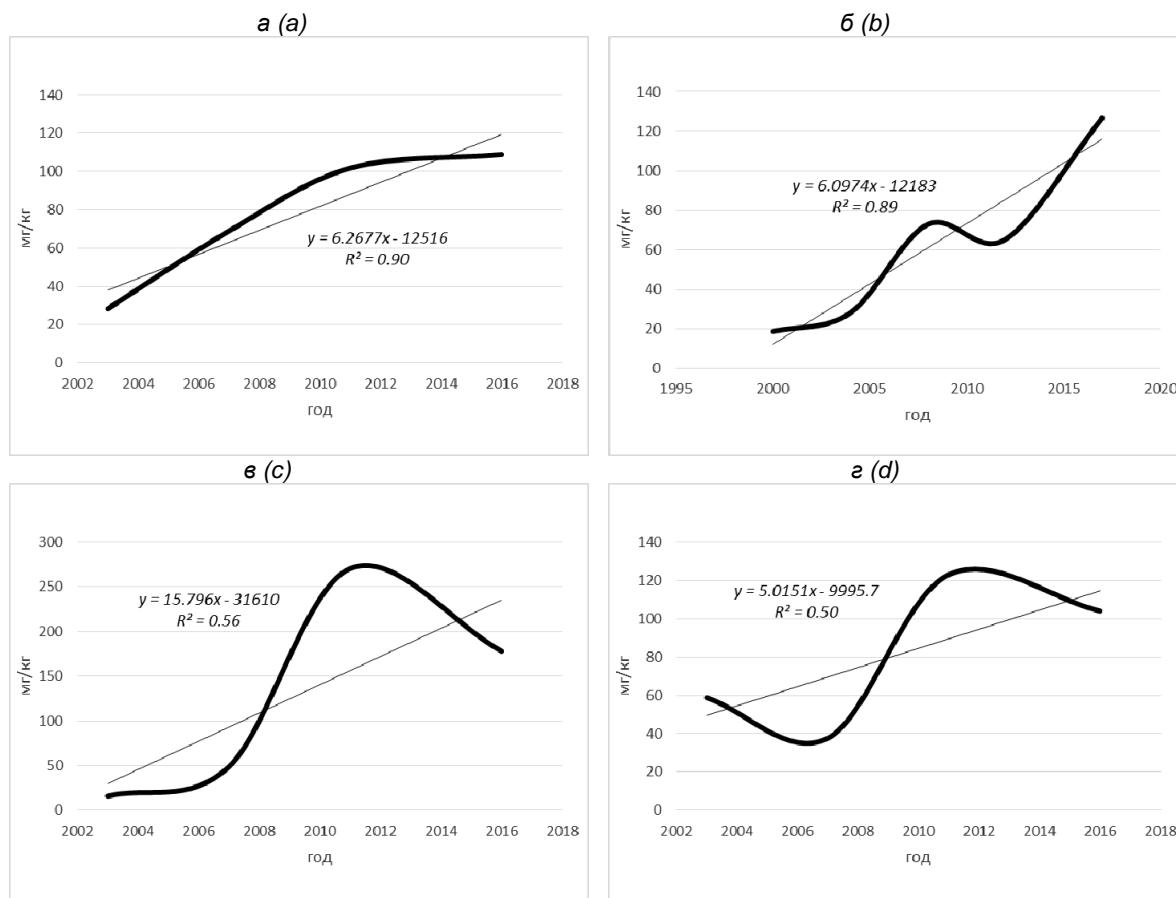


Рис. 4. Тренды в изменении содержания нефтепродуктов в почвах городов:  
а – Новополоцк; б – Калинковичи; в – Молодечно; г – Гомель

Fig. 4. Trends in changes in the content of petroleum products in the soils of cities:  
a – Novopolotsk; b – Kalinkovichi; c – Molodechno; d – Gomel

**Тренды в загрязнении почв тяжелыми металлами на территории г. Минска.** Выявленные для городов тенденции изменения содержания ТМ в почвах городов подтверждены в г. Минске 28-летним периодом наблюдений. Содержание цинка в почве г. Минска имеет устойчивую тенденцию к увеличению, свинца – к уменьшению (рис. 5).

Сравнение средних содержаний ТМ в почвах г. Минска, отобранных на одних и тех же 53 пробных площадках в 1990–1991, 2013–2014 и 2018–2019 гг., позволило выявить устойчивый тренд постепенного повышения содержания цинка в почвах города (см. рис. 5, а). Средняя концентрация цинка в 53 пробах почвы за рассматриваемый период увеличилась в 1,39 раза. Ежегодное увеличение содержания элемента в почвах города составило в среднем 0,57 мг/кг в год. При средней концентрации цинка в почвах г. Минска в 2019 г. 51,8 мг/кг можно ожидать, что уже в 2026 г. она превысит гигиенический норматив для песчаных и супесчаных почв (55 мг/кг).

Средняя концентрация свинца и цинка в 53 пробах почвы за рассматриваемый период уменьшилась в 1,34 раза. Ежегодное снижение содержания элемента в почвах города составило в среднем 0,22 мг/кг в год (см. рис. 5, б). Очевидно, что снижение концентрации свинца в почве города в последние два десятилетия было связано прежде всего со снижением техногенной нагрузки на почвы за счет отказа от свинцовых присадок в этилированном бензине и вымывания свинца из почвы поверхностным стоком и инфильтрующимися атмосферными осадками, а также механического нарушения почв передвижными механизмами, при строительных и иных земляных работах. Можно ожидать, что в перспективе темпы снижения концентраций свинца в почве города замедлятся.

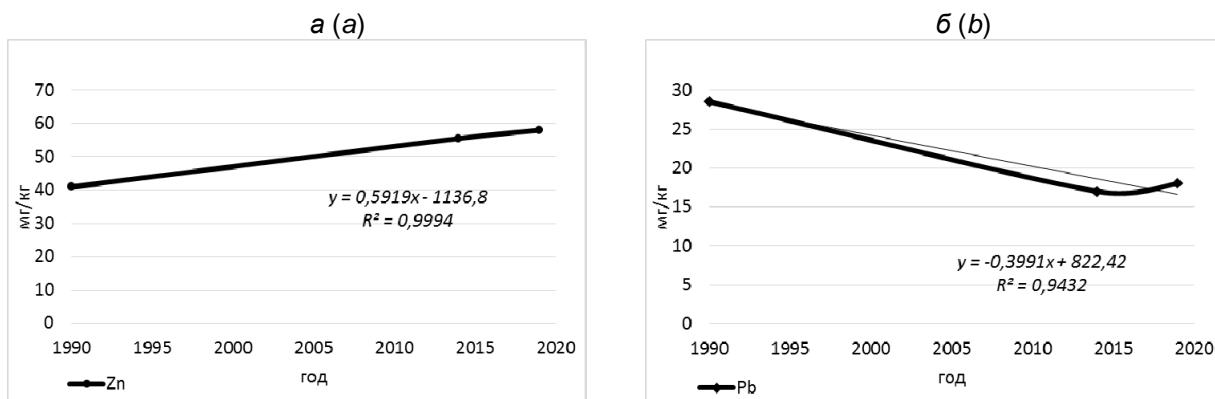


Рис. 5. Динамика средних содержаний цинка (а) и свинца (б) в почвах г. Минска (по 53 пробным площадкам), 1990/1991–2018/2019 гг.

Fig. 5. Dynamics of average zinc (a) and lead (b) contents in the soils of Minsk (for 53 trial sites), 1990/1991–2018/2019

**Заключение.** Оценка динамики содержания в почвах 26 городов Беларуси приоритетных загрязняющих веществ показала, что для большинства городов наблюдается тенденция накопления в почвенном покрове цинка и нефтепродуктов. Напротив, снижение содержания цинка в почве имеет место только в трех городах. Тенденция увеличения содержания цинка в почвах характерна для более половины (54 %) рассматриваемых городов Беларуси. Причем в подавляющем большинстве из них увеличение концентраций цинка в почве значительное – более 1,5 раза.

В 46 % городов имеет место снижение содержания свинца в почве против 19 %, в которых наблюдается повышение его концентрации. Для трети городов динамика в накоплении металла не прослеживается. Анализ изменений содержания меди в почвах городов Беларуси показал сходное со свинцом соотношение числа городов с различными тенденциями в изменении его содержания: уменьшение содержания меди зафиксировано в 44 % городов, увеличение – в 19 %. Для трети городов тренды не выявлены.

Из анализируемых ТМ наиболее благоприятная ситуация сложилась по никелю: в 58 % городов концентрация металла в почве имеет тенденцию к снижению и только в двух городах – к незначительному увеличению.

Выявленные тенденции изменения содержания химических веществ в почвах городов подтверждены в г. Минске 28-летним периодом наблюдений. Содержание цинка в почве г. Минска имеет устойчивую тенденцию к увеличению, свинца – к уменьшению. Ежегодное увеличение содержания цинка в почвах города составило в среднем 0,57 mg/kg в год. При средней концентрации цинка в почвах г. Минска в 2019 г. 51,8 mg/kg можно ожидать, что уже в 2026 г. она превысит гигиенический норматив для песчаных и супесчаных почв (55 mg/kg). Ежегодное снижение содержания свинца в почвах города составило в среднем 0,22 mg/kg в год. В перспективе темпы снижения концентраций свинца в почвах г. Минска замедлятся.

#### Список использованных источников

1. Выбросы тяжелых металлов в атмосферу: опыт оценки удельных показателей / С. В. Какарека [и др.]. – Минск : ИГН НАН Беларусь, 1998. – 156 с.
2. Гигиенический норматив «Показатели безопасности и безвредности почвы» : утв. Постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 25 янв. 2021 г. № 37.
3. Городская среда: геоэкологические аспекты / В. С. Хомич [и др.]. – Минск : Беларуская наука, 2012. – 426 с.
4. Загрязнение почв в Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2020 году : ежегодник. – Обнинск : ФГБУ «НПО «Тайфун», 2021. – 128 с.
5. Инструкция о порядке проведения наблюдений за химическим загрязнением земель : утв. Приказом Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 30 июля 2015 г. № 250-ОД.
6. Лукашёв, В. К. Изучение загрязнения почв тяжёлыми металлами на примере городов Белоруссии / В. К. Лукашёв, Л. В. Окунь // Докл. АН БССР. – 1991. – Т. 35, № 11. – С. 1009–1012.
7. Содержание тяжелых металлов в почвах жилой усадебной застройки г. Бреста / Н. В. Михальчук [и др.] // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2020. – № 2. – С. 115–120.
8. Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь, 2016–2021 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: nsmos.by/content/402.html. – Дата доступа: 16.09.2022.
9. Никифорова, Е. М. Динамика загрязнения городских почв свинцом (на примере Восточного округа Москвы) / Е. М. Никифорова, Н. Е. Кошелева // Почвоведение. – 2007. – № 8. – С. 984–997.

10. Хомич, В. С. Анализ структуры полей распределения тяжелых металлов в почвах г. Минска / В. С. Хомич, С. В. Каракеа, В. В. Парфенов // Природопользование. – Минск, 1996. – Вып. 1. – С. 134–139.
11. Проблемы обращения с городскими почвами загрязненными нефтепродуктами и тяжелыми металлами / В. С. Хомич [и др.] // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 76–90.
12. Янин, Е. П. Коррозия как источник загрязнения окружающей среды / Е. П. Янин. – М. : НП «АРСО», 2020. – 112 с.

### References

1. Kakareka S. V. [et al.] *Vybrosy tyazhelyh metallov v atmosferu: opty ocenki udel'nyh pokazatelej* [Emissions of heavy metals into the atmosphere: experience in assessing specific indicators]. Minsk, IGN NAS of Belarus Publ., 1998, 156 p. (in Russian)
2. *Gigienicheskiy normativ "Pokazateli bezopasnosti i bezvrednosti pochvy"* [Hygienic standard "Indicators of safety and harmlessness of the soil"]. Approved by the Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated January 25, 2021, no. 37. (in Russian)
3. Khomich V. S [et al.] *Gorodskaya sreda: geoekologicheskie aspekty* [Urban environment: geoecological aspects]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012, 426 p. (in Russian)
4. *Zagryaznenie pochv v Rossijskoj Federacii toksikantami promyshlennogo proiskhozhdeniya v 2020 godu : ezhegodnik* [Soil pollution in the Russian Federation by toxicants of industrial origin in 2020. Yearbook]. Obninsk, FGBU "NPO "Typhoon", 2021, 128 p. (in Russian)
5. *Instrukciya o poryadke provedeniya nablyudenij za himicheskim zagryazneniem zemel'* [Instructions on the procedure for conducting observations of chemical pollution of lands]. Approved by the Order of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus dated July 30, 2015, no. 250-OD. (in Russian)
6. Lukashov V. K., Okun L. V. *Izuchenie zagryazneniya pochv tyazholyimi metallami na primere gorodov Belorussii* [Study of soil pollution by heavy metals on the example of the cities of Belarus]. Dokl. AN BSSR = Dokl. AN BSSR, 1991, t. 35, no. 11, pp. 1009–1012. (in Russian)
7. Mikhchalchuk N. V., Dashkevich M. M., Bryl E. A. [et al.]. *Soderzhanie tyazhelyh metallov v pochvah zhiloj usadebnoj zastrojki g. Bresta* [The content of heavy metals in the soils of residential estate development in the city of Brest]. *Vesnik Bresckago universiteta = Bulletin of the Brest State University*. Ser. 5, Chemistry. Biology. Earth Sciences. 2020, no. 2, pp.115–120. (in Russian)
8. *Nacional'naya sistema monitoringa okruzhayushchej sredy v Respublike Belarus'*, 2016–2021 gg. (National environmental monitoring system in the Republic of Belarus, 2016–2021). Available at: [nsmos.by/content/402.html](http://nsmos.by/content/402.html). (accessed September 16, 2022). (in Russian)
9. Nikiforova E. M., Kosheleva N. E. *Dinamika zagryazneniya gorodskih pochv svincem (na primere Vostochnogo okruga Moskvy)* [Dynamics of pollution of urban soils with lead (on the example of the Eastern District of Moscow)]. *Pochvovedenie = Soil Science*, 2007, no. 8, pp. 984–997. (in Russian)
10. Khomich V. S., Kakareka S. V., Parfenov V. V. *Analiz struktury polej raspredeleniya tyazhelyh metallov v pochvah g. Minska* [Analysis of the structure of the distribution fields of heavy metals in the soils of Minsk]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 1996, no. 1, pp. 134–139. (in Russian)
11. Khomich V. S., Savchenko S. V., Ryzhikov V. A. [et al.]. *Problemy obrashcheniya s gorodskimi pochvami zagryaznennymi nefteproduktami i tyazhelyimi metallami* [Problems of handling urban soils contaminated with oil products and heavy metals]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2019, no. 1, pp. 76–90. (in Russian)
12. Yanin E. P. *Korroziya kak istochnik zagryazneniya okruzhayushchej sredy* [Corrosion as a source of environmental pollution]. Moscow, NP "ARSO" Publ., 2020, 112 p. (in Russian)

### Информация об авторах

**Хомич Валерий Степанович** – доктор географических наук, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: valery\_khomich@mail.ru

**Парфенов Вячеслав Викторович** – начальник отдела мониторинга земель, Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь). E-mail: pvv@hmc.by

**Савченко Светлана Валентиновна** – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: svscience@rambler.ru

### Information about the authors

**Valery S. Khomich** – D. Sc. (Geography), Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: valery\_khomich@mail.ru

**Vjacheslav V. Parfenov** – Head of Land Monitoring department Department, Republican Center for Hydro-meteorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring (110, Nezavisimosti Pr., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: pvv@hmc.by

**Svetlana V. Savchenko** – Ph. D. (Geology), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: svscience@rambler.ru

## ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РАСТЕНИЯХ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ СВИНЕЦСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Н. В. Михальчук, Е. А. Брыль

*Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларусь, Брест, Беларусь*

**Аннотация.** Представлены сведения об особенностях накопления элементов-загрязнителей культивируемыми и дикорастущими растениями в зоне влияния предприятия ООО «Белинвестторг-Сплав» (г. Белоозерск), в выбросах которого в воздушную среду присутствуют опасные поллютанты, включая и тяжелые металлы (ТМ). Анализ степени накопления элементов сельскохозяйственными растениями проводили в сравнении с субрегиональными фоновыми значениями и допустимыми уровнями ветеринарно-санитарных правил обеспечения безопасности кормов, кормовых добавок и сырья для производства комбикормов. В качестве основного критерия для оценки степени загрязнения ТМ листьев дикорастущих растений использовали показатели их фоновых концентраций, а также среднемировые значения.

Установленное аэробальное загрязнение свинцом возделываемых сельскохозяйственных растений в СЗЗ ООО «Белинвестторг-Сплав» и на прилегающих землях многократно превышает фоновые и санитарно-гигиенические значения. В ряду изученных дикорастущих видов растений наиболее чувствительными индикаторами аэро-генного загрязнения являются: из числа древесных растений – сосна обыкновенная (хвоя), в группе кустарников и кустарничков – омела белая и малина обыкновенная, среди травянистых растений – крапива двудомная. Результаты исследований свидетельствуют о необходимости расширения СЗЗ ООО «Белинвестторг-Сплав» как минимум до 1000 м (в особенности – по розе преобладающих ветров) и прекращения сельскохозяйственной деятельности в ее пределах.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы; аэroteхногенное загрязнение растительности; импактные зоны промышленных предприятий.

**Для цитирования.** Михальчук Н. В., Брыль Е. А. Особенности накопления тяжелых металлов в растениях в растениях зоны влияния предприятий по переработке свинецсодержащих отходов // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 122–135.

## FEATURES OF HEAVY METAL ACCUMULATION IN PLANTS OF THE ZONE OF INFLUENCE OF ENTERPRISES PROCESSING LEAD-CONTAINING WASTE

M. V. Mikhalkhuk, A. A. Bryl

*Polesie Agrarian Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Brest, Belarus*

**Abstract.** Information on the peculiarities of contaminant elements accumulation by cultivated and wild-growing plants in the zone of influence of Belinvesttorg-Splav LLC (Beloozersk), whose emissions into the air contain hazardous pollutants, including (heavy metals) HM, is presented. Analysis of the degree of elements accumulation by agricultural plants was carried out in comparison with subregional background values and permissible levels of veterinary and sanitary rules for ensuring the safety of feed, feed additives and raw materials for the production of mixed feed. As the main criterion for assessing the degree of contamination of HM leaves of wild plants, indicators of their background concentrations, as well as world averages, were used.

The established aero lead pollution of cultivated agricultural plants in the sanitary protection zone of Belinvesttorg-Splav LLC and in the adjacent lands repeatedly exceeds the background and sanitary-hygienic values. Among the wild plant species studied the most sensitive indicators of aerogenic pollution are: among the woody plants – common pine (needles), in the group of bushes and shrubs – white mistletoe and common raspberry, among herbaceous plants – dioica nettle. Research results testify to the necessity of sanitary protection zone extension for Belinvesttorg-Splav LLC at least up to 1000 m (especially – according to the rose of prevailing winds) and cessation of agricultural activities within it.

**Keywords:** heavy metals; aerotechnogenic pollution of vegetation; impact zones of industrial enterprises.

**For citation.** Mikhalkhuk M. V., Bryl A. A. Features of heavy metal accumulation in plants of the zone of influence of enterprises processing lead-containing waste. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 122–135.

**Введение.** Экологическое состояние почвенного и растительного покровов является важнейшим показателем глубины происходящих изменений в окружающей среде. Ландшафтно-геохимические методы, используемые при экологической оценке территорий, в том числе городских и пригородных, должны быть в первую очередь ориентированы на исследование реального распределения поллютантов в депонирующих средах, прежде всего в почвах и растениях. Существование прямых коррелятивных зависимостей между содержанием многих поллютантов в атмосферном воздухе и их содержанием в почвах и растениях, доступных для площадного опробования, позволяет использовать эти компоненты и элементы ландшафта для оценки степени загрязнения территории и выяснения особенностей его пространственного распределения [1].

Тяжелые металлы (ТМ) относятся к химическим элементам, отличающимся высокой токсичностью для всех живых организмов и способностью по пищевым цепям поступать в организм человека и животных, что представляет серьезную угрозу для их жизнедеятельности [2]. На протяжении многих десятилетий содержание ТМ в окружающей среде неуклонно повышается, что связано с быстрым развитием и активной работой промышленных и энергетических предприятий, увеличением количества автотранспорта, внесением в почву высоких доз минеральных удобрений, широким применением средств защиты растений. При этом ТМ имеют длительный период полураспада с сохранением своих токсических свойств, а также обладают кумулятивным действием, накапливаясь в живых организмах [3].

Для Республики Беларусь характерна ориентация на наращивание темпов роста и объемов производства в промышленности и сельском хозяйстве, что закономерно приводит к возрастанию техногенной нагрузки на окружающую среду, включая риски ее загрязнения химическими веществами, в том числе и ТМ. В литературе имеются многочисленные данные о накоплении и перераспределении ТМ и микроэлементов (МКЭ) в почвах и произрастающих на них растениях [4, 5]. В то же время весьма ограниченными являются сведения об особенностях аэрозольного загрязнения как культивируемых, так и дикорастущих растений в зонах влияния предприятий, в выбросах которых в воздушную среду присутствуют опасные поллютанты, включая и ТМ. Одним из таких предприятий, расположенных на территории Брестской области, является ООО «Белинвестторг-Сплав» (г. Белоозерск, Берёзовский район, Брестская область). Завод начал функционировать в 2013 г.; осуществляет производство марочного свинца и сплавов (порядка 10 тыс. т/год), т. е. на предприятии организовано плавильное производство. В границах 710-метровой санитарно-защитной зоны (СЗЗ) предприятия помимо промышленных и энергетических объектов, инженерных и транспортных коммуникаций расположены также сельскохозяйственные угодья ОАО «Песковское» (север-северо-восточный сектор) и фрагментарно – участки луговой и лугово-лесной растительности (юго-западный, юго-восточный и восточный сектора). В связи с этим в целях выяснения особенностей накопления ТМ и МКЭ дикорастущими и культурными растениями импактной зоны ООО «Белинвестторг-Сплав» и были проведены данные исследования.

**Материалы и методы исследования.** В 2018–2020 гг. осуществлен отбор проб растительных образцов как в пределах СЗЗ ООО «Белинвестторг-Сплав», так и в радиусе до 2,5 км от предприятия. Параллельно произведен отбор образцов на фоновых и условно фоновых территориях. Анализ степени накопления элементов сельскохозяйственными растениями проведен в сравнении с субрегиональными фоновыми уровнями и значениями допустимых уровней (ДУ) [6]. В качестве основного критерия для оценки степени загрязнения ТМ листьев дикорастущих растений нами выбран параметр их фоновых концентраций, а также среднемировые значения [7]. Согласно результатам наших исследований, обобщенный ранжированный ряд фоновых концентраций элементов в дикорастущих травянистых растениях (мг/кг) имеет вид: Mn161,87 > Fe102,65 > Zn48,01 > Cu6,6 > Cr1,07 > Ni0,54 > Cd0,20 > Pb0,16; в листьях кустарников – Mn222,70 > Fe87,58 > Zn44,01 > Cu4,59 > Ni0,97 > Cd0,26 > Pb0,22. Интенсивность накопления поллютантов в листьях оценена по коэффициенту концентрации (К<sub>к</sub>), который рассчитан как отношение содержания элемента в листьях растений исследуемой территории к значениям, полученным в фоновых условиях. В качестве критерия аномальности приняты значения К<sub>к</sub> > 1,5. Отбор образцов и их пробоподготовка осуществлены по [8, 9]. Растительные образцы проанализированы на содержание ТМ методом атомно-абсорбционной спектрометрии на приборе SOLAAR MkII M6 Double Beam AAS с пламенным атомизатором в лаборатории биогеохимии Полесского аграрно-экологического института НАН Беларуси по ГОСТ 30178-96 (Сыре и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов).

Статистическая обработка экспериментальных данных выполнена с использованием программ Microsoft Excel 2013 и Statistica 10.0.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Одним из критериев оценки благоприятности экологической ситуации территории является отсутствие накопления токсических концентраций химических элементов в тканях растений. Прежде всего это касается наиболее опасных элементов-загрязнителей, к числу которых в первую очередь относятся свинец и кадмий. Накопление ТМ растениями осуществляется путем адсорбции доступных ионов корнями из почвы, а также ассимиляционными

органами (листьями) из атмосферного воздуха. Поэтому уровень содержания элементов в растениях – комплексный показатель, отражающий загрязнение и почвы, и воздуха. Поступление ТМ в растения может происходить корневым путем – после переноса частиц загрязнителя в почву вместе с атмосферными осадками, и фолиарным путем – при непосредственном осаждении на листьях. Сегодня свинец – один из самых главных компонентов химического загрязнения окружающей среды, поэтому его концентрация в растительности многих стран заметно возросла. При воздушной миграции основная часть Pb концентрируется в парогазовой фракции аэрозоля [10], поэтому элемент может переноситься на значительные расстояния. Согласно [4], переносимый по воздуху Pb – главный источник свинцовых загрязнений – также легко поглощается растениями через листву. В работе [11] также подчеркивается, что надежным индикатором загрязнения среды через атмосферу являются листья многих древесных пород и травянистых растений.

Согласно [12], по градиенту содержания в растениях элементы можно расположить в следующем порядке Mn > Fe > Zn > Cu > Ni > Pb > Cd, из которого видно, что в растениях наиболее интенсивно накапливаются Mn, Fe, Zn, а также Cu, что согласуется с физиологическим значением этих элементов. Подобный ряд характерен, к примеру, для растительности Березинского биосферного заповедника. Так, в среднем в фитомассе хвойных и лиственных деревьев заповедника концентрации элементов (мг/кг) образуют следующий ряд по убыванию: Mn162,0 > Fe112,0 > Zn51,0 > Cu3,3 > Cr2,8 > Ni2,0 > Pb0,6 > Cd0,3 > Co0,2 [13].

Результаты аналитического исследования проб сельскохозяйственных растений, отобранных в фоновых агроландшафтах и в импактной зоне ООО «Белинвестторг-Сплав», приведены в табл. 1; общие особенности пространственного распределения загрязнений хозяйственно ценных видов растений представлены на рис. 1. Они вскрывают ряд особенностей в накоплении различными частями растений ТМ и МКЭ в пространственном распределении элементов-загрязнителей.

Прежде всего обнаруживаются довольно значительные превышения в накоплении свинца растениями, произрастающими в ареале воздействия ООО «Белинвестторг-Сплав» в сравнении с фоновыми содержаниями элемента в культивируемых и дикорастущих травянистых растениях (они совпадают и составляют 0,16 мг/кг сухого вещества) и ДУ содержания элемента в зеленых кормах (0,6 мг/кг). Так, в зеленой массе рапса озимого (посев – август 2019 г.), отобранный 16.10.2019 в С33 предприятия (в 420 м к северу от завода), содержание свинца оказалось на уровне 9,48 мг/кг, или в 15,3 раза выше фонового значения и в 15,8 раза выше ДУ. В зеленой массе кукурузы на удалении 0,92 км к северу от предприятия содержание элемента составило 3,60 мг/кг, а превышения – в 22,5 и в 6,0 раза соответственно; на расстоянии 1,02 км к востоку – 2,55 мг/кг, или в 15,9 и 4,3 раза выше фона и ДУ соответственно. Зеленая масса клевера лугового имела несколько более низкий уровень загрязнения – 1,53 мг/кг, однако и он в 9,6 и 2,6 раза соответственно превышал базовые контрольные показатели. Примерно такие же уровни загрязнения были выявлены в 2020 г. на тех же местоположениях в отношении щавеля кормового – 10,16 и 1,72 мг/кг соответственно. При этом на фоновых территориях, удаленных от крупных источников аэрогенных эмиссий, содержание свинца в злаковых и бобовых культурах существенно не отличалось от фоновых значений и было в 3–4 раза ниже ДУ.

В тканях некоторых культур в концентрациях выше фоновых и санитарно-гигиенических значений фиксируется кадмий. Так, в зеленой массе рапса его содержание может достигать 0,26 мг/кг, румекса – 0,20 мг/кг при ДУ 0,1 мг/кг и фоновой величине 0,07 мг/кг. Необходимо отметить, что по фитотоксичности и способности накапливаться в растениях кадмий среди рассматриваемых элементов занимает первое место (Cd > Cu > Zn > Pb) [14].

В зерне озимого тритикале, полученном на условно фоновых и фоновых территориях, свинец доступными аналитическими методами не фиксировался вовсе, а в зоне влияния завода ООО «Белинвестторг-Сплав» обнаруживался в незначительных количествах – 0,04 мг/кг. Несколько более высоким в этом ареале оказалось содержание свинца в зерне кукурузы (0,11 мг/кг) и овса посевного (0,15 мг/кг), однако и они не превышали нормативной величины (5,0 мг/кг). По-видимому, листовые обертки початков кукурузы и чешуйки зерновок хлебных злаков достаточно надежно защищают их от аэрогенных выпадений загрязняющих веществ. Самые чешуйки злаков накапливают свинец в незначительной степени – на уровне 0,09–0,15 мг/кг. Согласно [1], для зерновых культур отмечается устойчивость (толерантность) к действию даже высоких концентраций свинца, хотя речь в цитируемой работе, по-видимому, идет о почвенно-корневом поглощении элемента.

Согласно [15], информативным показателем техногенного загрязнения окружающей среды является величина соотношения Pb/Mn; она характеризует пропорцию техногенных и биофильных элементов в растениях и может свидетельствовать об их состоянии.

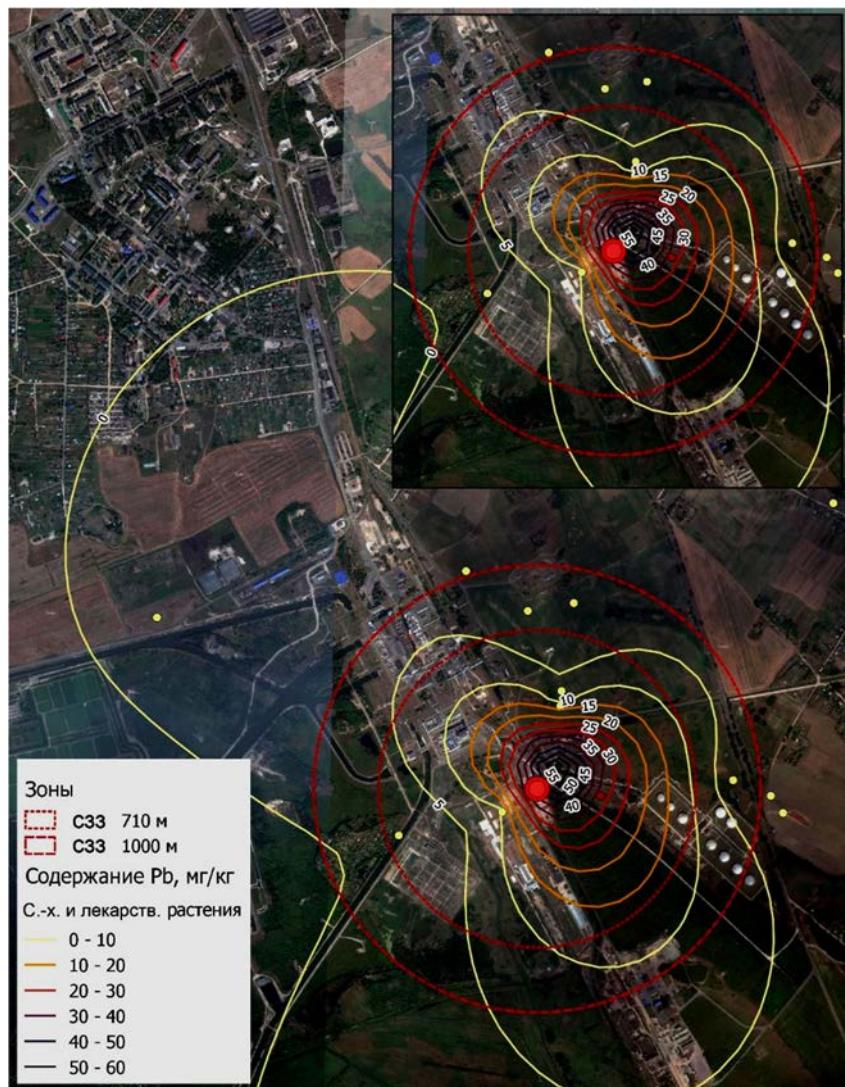
Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в растительной продукции, полученной в агроландшафтах импактной зоны и фоновых территорий, 2019–2020 гг.

Table 1. Heavy metals content in plant products obtained in the impact zone and background agrolandscapes, 2019–2020

Зона	Предприятие АПК	Культура	Сырье	Г	Содержание элемента, мг/кг воздушно-сухого вещества									
					Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Co	Cr	
А	ОАО «Песковское» (Берёзовский район, Брестская область)	Рапс озимый	3М	0,42	9,48	0,26	5,01	39,79	0,46	26,94	78,33	0	0,65	
					8,3–10,65	0,22–0,30	4,92–5,09	32,82–46,75	0,35–0,56	26,24–27,64	72,86–83,80	–	0,64–0,66	
		Тимофеевка луговая	3М	0,85	3,12	0,03	6,60	37,87	0,94	80,84	73,52	0	0,90	
					1,07–5,16	0,01–0,04	4,83–8,37	28,84–46,90	0,59–1,29	66,66–95,02	73,42–73,62	–	0,83–0,96	
		Клевер луговой	3М	0,85	1,53	0,03	6,04	27,00	1,84	45,50	59,23	0,53	0,98	
		Кукуруза	3М	0,92	3,60	0,07	3,53	15,55	0,00	57,00	71,76	0	0,25	
					0,04–4,15	0,06–0,07	3,28–3,78	15,0–16,10	–	52,33–61,97	70,09–73,42	–	–	
			3М	1,02	2,55	0,03	4,61	25,66	0,11	34,36	133,64	0	0,70	
					2,39–2,70	0,02–0,03	4,43–4,78	25,24–26,08	0,02–0,19	28,89–39,82	67,22–200,05	–	0,62–0,78	
			3	0,92	0,11	0	0,09	20,59	0,17	5,00	15,07	0	0,09	
					0,06–0,16	–	0,08–0,10	18,73–22,45	0,15–0,18	4,82–5,18	13,04–17,10	–	0,08–0,09	
		3М	1,10	–	1,46	0	2,67	29,71	11,01	54,26	459,19	0,39	0	
					0–1,46	–	2,02–3,31	23,69–35,72	8,5–13,52	36,91–71,61	416,94–501,43	0,31–0,46	–	
		Овес посевной	3	1,60	0,15	0	1,28	30,70	0,46	30,25	21,56	0	0,23	
		Тритикале озимое	3	1,00	0,04	0	2,44	36,56	0,17	22,42	19,36	0	0,16	
					0–0,13	–	1,77–3,31	32,34–42,87	0,17–0,20	21,73–23,79	18,56–20,47	–	–	
		Румекс (щавель кормовой)	3М	0,42	10,16	0,14	4,90	30,54	0	65,90	131,90	0	0,27	
					9,84–10,48	0,12–0,16	4,64–5,16	30,14–30,94	–	65,90	131,90	–	0,26–0,28	
			0,85	–	1,72	0,20	5,28	45,32	0	274,0	108,68	0,34	0,22	
Б	ОАО «Брестский аграрий» (Брестский район)	Тритикале озимое	3	6,00	0	0	3,06	37,34	0	17,52	23,11	0	0,16	
					–	–	1,75–4,30	28,40–50,41	–	12,80–22,78	21,04–26,08	–	0,13–0,19	
В	ОАО «Красный партизан» (Малоритский район, Брестская область)	Тритикале озимое	3	35,00	0	0	1,81	50,03	0	33,18	22,75	0	0,21	
		–	–		–	1,04–2,58	47,87–52,19	–	24,44–38,91	22,28–23,22	–	0,19–0,00		
		Райграс пастбищный	3М		0,18	0	2,92	32,71	0,25	58,05	–	–	0,40	
					0–0,36	–	2,76–3,07	26,85–38,57	0,20–0,29	53,58–62,52	–	–	0,32–0,48	
		Клевер луговой	3М		0,15	0,10	5,15	50,45	0,39	61,70	–	–	0,12	
		Кукуруза	3М		0,12–0,18	0,07–0,13	3,61–6,18	38,09–61,27	0,33–0,52	48,99–77,33	–	–	0,09–0,19	
		–	–	–	0,68	0,00	2,94	23,57	2,44	28,01	–	0,14	–	
		–	–	–	0,56–0,79	0,00	2,83–3,05	19,34–27,79	1,79–3,08	22,44–33,57	–	0,13–0,15	–	
ДУ			3М	–	0,6 (0,3*)	0,1 (0,07*)	–	–	–	–	–	–	–	
Фон для многолетних травянистых кормовых культур на дерново-подзолистых песчаных почвах			3	–	0,16 ± 0,04	0,07 ± 0,01	5,15 ± 0,44	36,53 ± 3,43	0,24 ± 0,04	66,04 ± 10,16	–	–	0,24 ± 0,06	
			–	–	0,06–0,37	0,03–0,12	4,17–6,84	26,66–48,96	0,11–0,34	33,84–102,52	–	–	0,00–0,38	

\* В рационах животных, продукция от которых используется для производства детского питания.

П р и м е ч а н и я: 1) в числителе приведено среднее значение, в знаменателе – min–max; 2) курсивом выделены данные за 2020 г.; 3) А – импактная зона (аэрогенные выбросы ООО «Белинвестторг-Сплав», г. Белоозерск); Б – условно фоновая территория (урботехногенные эмиссии г. Бреста и АМ М1-Е 30); В – фоновая территория (>35 км от крупных источников аэрогенных выбросов); Г – расстояние от источника эмиссий, км; АПК – аграрно-промышленный комплекс; ДУ – допустимый уровень; 3 – зерно; 3М – зеленая масса.



**Рис. 1. Пространственное распределение загрязнения свинцом зеленой массы хозяйственно ценных растений (ареал ООО «Белинвестторг-Сплав», г. Белоозерск, Березовский район, Брестская область)**

**Fig. 1. Spatial distribution of lead contamination of green mass of economically valuable plants (areal of Belinvesttorg-Splav LLC, Beloozersk, Berezovsky district, Brest region)**

В растительной массе большинства культур с фоновых территорий соотношение Pb/Mn составляет 0,002–0,003; лишь у кукурузы оно повышается до 0,02. В техногенной среде, формируемой ООО «Белинвестторг-Сплав», данное соотношение имеет разброс в зависимости от вида растений от 0,03 до 0,35, т. е. возрастает на несколько порядков. При этом наибольший показатель характерен для рапса – 0,35. Резкое увеличение показателя Pb/Mn в растительности в техногенных ландшафтах свидетельствует о нарушении сбалансированности в элементном обеспечении процессов метаболизма в возделываемых растениях.

Сравнительный анализ содержания ТМ и МКЭ в образцах дикорастущих видов растений, отобранных в юго-восточном секторе С33 (250–340 м от предприятия) в разные фазы вегетационных периодов 2018–2020 гг., показывает, что в группе токсичных ТМ превалируют свинец и кадмий. Так, обобщение данных аналитических исследований, которые приведены в табл. 2 и отражают ситуацию по состоянию на 16.10.2019, свидетельствует о том, что в рассматриваемой локации абсолютно преобладает свинцовое загрязнение воздушного бассейна. В группе древесных растений наиболее чутким его индикатором является сосна обыкновенная – содержание Pb в хвое составило 154 мг/кг, Кк – 1711,2. В листьях березы и яблони обнаружены сопоставимые концентрации элемента – 64,7 и 68,5 мг/кг, Кк – 718,4 и 761,0 соответственно. Ассимиляционные органы сосны подвергаются вредному воздействию круглогодично; этим объясняется повышенное накопление свинца хвоей в сравнении с листвопадными породами. Необходимо отметить, что содержание свинца выше 10 мг/кг может являться токсичным для большинства растений [16].

**Таблица 2. Содержание тяжелых металлов и микроэлементов в листьях дикорастущих видов растений (санитарно-защитная зона ООО «Белинвестторг-Сплав», г. Белоозерск, Берёзовский район, Брестская область; отбор 16.10.2019)**

**Table 2. Heavy metals and microelements content in leaves of wild plant species (Sanitary Protection Zone of Belinvesttorg-Splav LLC, Beloozersk, Berezovsky district, Brest region; sampling 16.10.2019)**

Образец		Содержание элемента, мг/кг воздушно-сухого вещества									
		Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Co	Cr	
Древесные растения	Береза бородавчатая (лист)	64,66	1,72	3,40	92,29	1,14	966,3	79,96	0,85	0,61	
		718,4	8,2	0,8	1,0	1,3	2,9	1,2	–	–	
	Сосна обыкновенная (хвоя)	154,01	1,01	4,14	46,91	0,72	114,87	161,53	0,03	0,42	
		1711,2	4,8	0,9	0,5	0,8	0,3	2,5	–	–	
	Яблоня (лист)	68,49	2,49	5,43	13,88	0,94	21,69	152,08	0	0,73	
		761,0	11,9	1,2	0,1	1,1	0,1	2,3	–	–	
Дикорастущие кустарнички и кустарники (листья)	Вереск обыкновенный	83,83	1,01	4,7	9,77	1,91	341,47	141,55	0	0,35	
		381,0	3,9	1,0	0,2	2,0	1,5	1,6	–	0,5	
	Чабрец обыкновенный	42,39	0,91	4,52	37,15	0,43	63,31	102,64	0	0,54	
		192,7	3,5	1,0	0,8	0,4	0,3	1,2	–	0,8	
	Малина обыкновенная (лист)	267,23	6,93	6,76	41,34	0,53	410,99	243,64	0	0,74	
		1214,7	26,7	1,5	0,9	0,5	1,8	2,8	–	1,0	
	Омела белая	60,7	0,54	11,96	109,52	4,72	69,21	117,81	0,56	0,47	
		275,9	2,1	2,6	2,5	4,9	0,3	1,3	–	0,7	
Дикорастущие травянистые растения	Щавель кислый	99,25	2,03	4,45	31,15	0,76	68,19	180,44	0,09	0,70	
		620,3	10,2	0,7	0,6	1,4	0,4	1,8	–	0,7	
	Крапива двудомная	266,18	4,39	4,78	30,15	0,31	124,53	203,18	0	1,75	
		1663,6	22,0	0,7	0,6	0,6	0,8	2,0	–	1,6	
Средневзвешенное содержание		122,97	2,34	5,57	45,79	1,27	242,28	153,65	0,17	0,70	
Усредненный коэффициент концентрации		837,6	10,3	1,2	0,8	1,4	0,9	1,9	–	0,9	
Фон	Деревья (листья)	0,09 ± 0,03	0,21 ± 0,1	4,52 ± 0,39	93,94 ± 30,78	0,88 ± 0,13	333,04 ± 60,63	65,16 ± 9,29	0	0	
		0–0,4	0–1,32	2,08–7,0	15,83–319,52	0,13–1,91	91,63–712,3	23,59–137,13	–	–	
	Дикорастущие кустарнички и кустарники (листья)	0,22 ± 0,04	0,26 ± 0,05	4,59 ± 0,55	44,01 ± 4,38	0,97 ± 0,08	222,70 ± 17,05	87,58 ± 14,36	0	0,71 ± 0,17	
		0–0,63	0–2,04	2,51–7,05	12,18–222,59	0,12–0,97	26,02–727,69	33,10–226,66	–	0,63–0,87	
	Дикорастущие травянистые растения	0,16 ± 0,02	0,20 ± 0,03	6,60 ± 0,53	48,01 ± 3,49	0,54 ± 0,06	161,87 ± 14,03	102,65 ± 1248	0	1,07 ± 0,19	
		0–0,98	0–1,0	1,48–24,48	13,23–142,11	0–2,21	12,00–478,38	23,38–595,04	–	0,38–1,81	
Среднее для растительности мира [7]		1,25	0,04	8,0	30,0	–	–	–	–	–	

П р и м е ч а н и е. В числителе приведено среднее значение, в знаменателе – коэффициент концентрации.

Абсолютные максимумы накопления свинца в ряду кустарниковых форм выявлены у малины обыкновенной (267,2 мг/кг), среди травянистых растений – у крапивы двудомной (266,2 мг/кг), Кк составили 1214,7 и 1663,6 соответственно. Столь высокие уровни загрязнения объясняются морфологическими особенностями листьев данных видов: у обоих растений они покрыты многочисленными эпидермальными выростами, что значительно увеличивает общую площадь контакта с воздушной средой и, следовательно, интенсивность осаждения поллютантов.

Помимо свинца в аэрогенных эмиссиях предприятия заметное присутствие обнаруживает кадмий; элемент обладает канцерогенными свойствами и является одним из самых токсичных ТМ. Основная проблема техногенного загрязнения окружающей среды кадмием обусловлена токсичностью этого элемента даже в низких концентрациях. Активная воздушная миграция кадмия происходит благодаря его концентрации в парогазовой и мелкодисперсной фракции аэрозоля [1]. Он способен накапливаться в растениях, легко поступая через корневую систему и листовые пластинки. Содержание кадмия в листьях в большинстве рассматриваемых случаев превышает 1,0 мг/кг (за исключением чабреца и омелы белой) при фоновых значениях 0,20–0,26 мг/кг. Как и в ситуации с загрязнением свинцом, максимальные концентрации кадмия наблюдаются в листьях малины обыкновенной – 6,93 мг/кг (Кк = 26,7) и крапивы двудомной – 4,39 мг/кг (Кк = 22,0). Десятикратное и более превышение фонового содержания элемента характерно для щавеля кислого (10,2) и яблони (11,9).

Содержание никеля оказалось на уровне, совпадающем с границей аномальности (усредненный Кк = 1,5), а содержание железа – на уровне, несколько превышающем ее (Кк = 1,9), что свидетельствует о присутствии в аэрогенных выбросах предприятия данных металлов. Накопление остальных элементов находилось в границах фоновых показателей или близких к ним значений и не связано с деятельностью предприятия.

Выявлено также, что химический состав листьев исследуемых видов растений существенно меняется в течение периода вегетации. Так, отбор образцов листьев в первой декаде июля (07.07.2018; табл. 3) выявил существенно более низкие уровни накопления приоритетных загрязнителей – свинца и кадмия – в сравнении с отборами октября 2019 г. (табл. 2).

Средневзвешенное содержание свинца составило 30,43 мг/кг, кадмия – 0,56 мг/кг, что меньше осенних показателей в 4,0 и 4,2 раза соответственно. Однако и летние уровни загрязнения, формирующиеся уже к середине вегетационного периода, оказались весьма существенными: превышение фоновых концентраций по свинцу достигает 244-кратных значений. Накопление элемента неуклонно возрастает по ходу вегетационного сезона и к его окончанию (16.10.2019) достигает максимальных значений: средневзвешенное содержание в растениях составляет 122,97 мг/кг, а усредненный Кк – более 837 единиц.

Открытым сегодня остается вопрос о том, какая часть загрязняющих веществ при аэральном их выпадении способна проникать через устьица и эпидермис листа и «закрепляться» внутрифиолиарно, а какая, оставаясь на поверхности листьев, может впоследствии также поступить в цепи питания или быть смытой осадками.

В рамках решения данного вопроса интерес представляют результаты исследования образцов растительности, отобранных в СЗЗ предприятия 19.06.2020 через 20 часов после выпадения ливневых осадков продолжительностью более 1 часа (18.06.2020 – с 20.00 до 21.15). Если сравнивать полученные данные с результатами от 07.07.2018, которые отражают уровни накопления в двухнедельный бездождевой период, то очевидной становится видоспецифичная способность к внутритканевой аккумуляции поллютантов. В наибольшей мере в рассматриваемых условиях она проявляется у бересклета повислого. И хотя абсолютные значения (11,26 мг/кг) в 1,3 раза ниже, чем у яблони (14,59 мг/кг) (табл. 4), они оказались практически тождественны уровню, зафиксированному 07.07.2018 (11,76 мг/кг) (табл. 3). У остальных сравниваемых видов аккумуляция свинца в тканях листьев существенно ниже: у древесных форм – в 3,8–4,7 раза, у крапивы двудомной – более чем в 60 раз. Безусловно, проводя подобные сравнения, мы допускаем, что выбросы предприятия в воздушный бассейн происходили равномерно по ходу теплого периода и в разрезе лет, что маловероятно. Весьма динамичны и погодные условия, особенно по показателю выпадающих осадков. Однако не вызывает сомнения, что определенная и весьма существенная часть поступающих на листовую поверхность поллютантов способна прочно фиксироваться в тканях листа. Расчеты показывают, что у древесных видов из общего пула накапливающегося свинца от 20 % и более составляет прочно связанная компонента. У другого токсичного элемента – кадмия, эти показатели, по-видимому, еще выше.

Различия в содержании остальных рассматриваемых металлов, относящихся в своем большинстве к числу эссенциальных элементов, обусловлены в первую очередь спецификой их участия в биологических процессах, протекающих в растительных организмах по ходу вегетации, а также глубиной биогеохимических трансформаций вследствие развития в условиях техногенной среды.

**Таблица 3. Содержание тяжелых металлов и микроэлементов в листьях дикорастущих видов растений (санитарно-защитная зона ООО «Белинвестторг-Сплав», г. Белоозерск, Берёзовский район, Брестская область; отбор 07.07.2018)**

**Table 3. Heavy metals and microelements content in leaves of wild plant species (Sanitary Protection Zone of Belinvesttorg-Splav LLC, Beloozersk, Berezovsky district, Brest region; sampling 07.07.2018)**

Образец		Содержание элемента, мг/кг воздушно-сухого вещества									
		Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Co	Cr	
Древесные растения	Береза бородавчатая (лист)	11,76	0,47	35,44	182,59	0,9	156,2	68,66	0	0,39	
		130,7	2,2	7,8	1,9	1,0	0,5	1,1	—	—	
	Сосна обыкновенная (хвоя)	17,5	0,18	33,21	25,8	1,38	55,33	48,65	0	0,19	
		194,4	0,9	7,3	0,3	1,6	0,2	0,7	—	—	
	Яблоня (лист)	68,47	0,43	48,24	9,94	0,56	25,15	195,48	0	0,41	
		760,8	2,0	10,7	0,1	0,6	0,1	3,0	—	—	
Дикорастущие кустарнички и кустарники (листья)	Чабрец обыкновенный	27,32	0,85	7,01	43,84	5,12	118,48	147,62	0	0,76	
		124,2	3,3	1,5	1,0	5,3	0,5	1,7	—	1,1	
	Зверобой обыкновенный	17,14	0,3	11,99	38,07	1,32	45,14	65,08	0,11	0,43	
		107,1	1,5	1,8	0,8	2,4	0,3	0,6	0,69	0,4	
Дикорастущие травянистые растения	Цмин песчаный	13,48	1,13	6,62	45,0	9,49	102,18	68,29	0,5	0,67	
		84,3	5,7	1,0	0,9	17,6	0,6	0,7	—	0,6	
	Тысячелистник обыкновенный	17,05	0,6	8,54	37,19	1,99	53,48	61,38	0	0,66	
		106,6	3,0	1,3	0,8	3,7	0,3	0,6	—	0,6	
	Крапива двудомная	70,71	0,55	9,18	27,81	0,46	74,24	214,05	0	1,05	
		441,9	2,8	1,4	0,6	0,9	0,5	2,1	—	1,0	
Средневзвешенное содержание		30,43	0,56	20,03	51,28	2,65	78,78	108,65	0,08	0,57	
Усредненный Кк		243,8	2,7	4,1	0,7	4,1	0,4	1,3	—	0,7	
Фон	Деревья (листья)	0,09 ± 0,03	0,21 ± 0,1	4,52 ± 0,39	93,94 ± 30,78	0,88 ± 0,13	333,04 ± 60,63	65,16 ± 9,29	0	0	
		0–0,4	0–1,32	2,08–7,0	15,83–319,52	0,13–1,91	91,63–712,3	23,59–137,13	—	—	
	Дикорастущие кустарнички и кустарники (листья)	0,22 ± 0,04	0,26 ± 0,05	4,59 ± 0,55	44,01 ± 4,38	0,97 ± 0,08	222,70 ± 17,05	87,58 ± 14,36	0	0,71 ± 0,17	
		0–0,63	0–2,04	2,51–7,05	12,18–222,59	0,12–0,97	26,02–727,69	33,10–226,66	—	0,63–0,87	
	Дикорастущие травянистые растения	0,16 ± 0,02	0,20 ± 0,03	6,60 ± 0,53	48,01 ± 3,49	0,54 ± 0,06	161,87 ± 14,03	102,65 ± 1248	0	1,07 ± 0,19	
		0–0,98	0–1,0	1,48–24,48	13,23–142,11	0–2,21	12,00–478,38	23,38–595,04	—	0,38–1,81	
Среднее для растительности мира [7]		1,25	0,04	8,0	30,0	—	—	—	—	—	

П р и м е ч а н и е. В числителе приведено среднее значение, в знаменателе – коэффициент концентрации.

**Таблица 4. Содержание тяжелых металлов и микроэлементов в листьях дикорастущих видов растений (санитарно-защитная зона ООО «Белинвестторг-Сплав», г. Белоозерск, Берёзовский район, Брестская область; отбор 19.06.2020, через 20 часов после ливневых осадков)**

**Table 4. Heavy metals and microelements content in leaves of wild plant species (Sanitary Protection Zone of Belinvesttorg-Splav LLC, Beloozersk, Berezovsky district, Brest region; sampling on 19.06.2020, 20 hours after heavy rainfall)**

Образец		Содержание элемента, мг/кг воздушно-сухого вещества									
		Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Co	Cr	
Древесные растения	Береза бородавчатая (лист)	11,26	0,30	5,43	114,74	0,93	75,42	62,70	0	0,61	
		125,1	1,4	1,2	1,2	1,1	0,2	1,0	–	–	
	Сосна обыкновенная (хвоя)	4,63	0,14	6,61	36,59	4,44	139,73	30,35	0	0,38	
		51,4	0,7	1,5	0,4	5,1	0,4	0,5	–	–	
	Яблоня (лист)	14,59	0,35	5,80	27,64	0,36	117,22	121,64	0	0,97	
		162,1	1,7	1,3	0,3	0,4	0,4	1,9	–	–	
Дикорастущие кустарнички и кустарники (листья)	Малина обыкновенная (лист)	1,00	0,16	4,32	22,04	0,90	51,05	71,98	0	0,69	
		4,6	0,6	0,9	0,5	0,9	0,2	0,8	–	1,0	
Дикорастущие травянистые растения	Люцерна синегибридная	0,73	0,00	5,18	24,25	0,64	14,19	51,24	0	0,81	
		4,6	–	0,8	0,5	1,2	0,1	0,5	–	0,8	
	Кипрей узколистный (открытое место)	3,66	0,04	7,03	36,10	0,48	59,68	112,14	0	0,78	
		22,9	0,2	1,1	0,8	0,9	0,4	1,1	–	0,7	
	Крапива двудомная	1,17	0,04	5,92	32,86	0,39	70,38	68,41	0	1,77	
		7,31	0,2	0,9	0,7	0,7	0,4	0,7	–	1,7	
Средневзвешенное содержание		5,29	0,15	5,76	42,03	1,16	75,38	74,07	0	0,86	
Усредненный коэффициент концентрации		54,0	0,7	1,1	0,6	1,5	0,3	0,8	–	1,1	
Фон	Деревья (листья)	0,09 ± 0,03	0,21 ± 0,10	4,52 ± 0,39	93,94 ± 30,78	0,88 ± 0,13	333,04 ± 60,63	65,16 ± 9,29	0	0	
		0–0,40	0,00–1,32	2,08–7,00	15,83–319,52	0,13–1,91	91,63–712,30	23,59–137,13	–	–	
	Дикорастущие кустарнички и кустарники (листья)	0,22 ± 0,04	0,26 ± 0,05	4,59 ± 0,55	44,01 ± 4,38	0,97 ± 0,08	222,70 ± 17,05	87,58 ± 14,36	0	0,71 ± 0,17	
		0–0,63	0–2,04	2,51–7,05	12,18–222,59	0,12–0,97	26,02–727,69	33,10–226,66	–	0,63–0,87	
	Дикорастущие травянистые растения	0,16 ± 0,02	0,20 ± 0,03	6,60 ± 0,53	48,01 ± 3,49	0,54 ± 0,06	161,87 ± 14,03	102,65 ± 1248	0	1,07 ± 0,19	
		0–0,98	0–1,00	1,48–24,48	13,23–142,11	0–2,21	12,00–478,38	23,38–595,04	–	0,38–1,81	
Среднее для растительности мира [7]		1,25	0,04	8,0	30,0	–	–	–	–	–	

П р и м е ч а н и е. В числителе приведено среднее значение, в знаменателе – коэффициент концентрации.

Вывод о способности к внутрифолиарной фиксации токсикантов подтверждается результатами исследования их поведения в вегетативной части *Viscum album* L. (табл. 5). Омела белая – многолетнее вечнозеленое растение-полупаразит. Закрепляясь на ветвях преимущественно лиственных пород, в частности березы, омела не связана с почвенными субстратами и достаточно точно отражает специфику аэрогенного загрязнения окружающей среды. Результаты, приведенные в табл. 5, демонстрируют, что ожидаемо максимальные уровни накопления свинца наблюдаются вблизи предприятия. Так, в 150 м к юго-востоку (по розе господствующих ветров) содержание элемента составило 54,84 мг/кг, или около 122 фоновых значений (для омелы белой оно составляет 0,45 мг/кг). При увеличении расстояния в 2,5 раза (до 380 м) загрязненность омелы уменьшилась также в 2,5 раза – до уровня 22,21 мг/кг. Проба ОмБ2, отобранная на удалении в 1,29 км к юго-востоку от предприятия у частного подворья восточнее автодороги Дрогичин – Берёза, содержала 5,26 мг/кг свинца, или была в 11,7 раза выше фона, т. е. при увеличении расстояния в 8,6 раза свинца в листьях оказалось в 10,4 раза меньше. Характерно, что в пробах, взятых в север-северо-западном направлении (против господствующих ветров), уровни содержания свинца ниже 5,0 мг/кг наблюдались уже на расстоянии 440 м от предприятия: в образце ОмБ9 количество металла составило 4,05 мг/кг (9 фоновых величин). Это сравнение показывает, сколь существенную роль в загрязнении территории играет ее расположение по розе ветров относительно источника воздушных эмиссий.

**Таблица 5. Содержание тяжелых металлов и микроэлементов в листьях *Viscum album* L., отобранных 21.11.2020 в импактной зоне ООО «Белинвестторг-Сплав» (г. Белоозерск, Берёзовский район, Брестская область), г. Бресте и на фоновых территориях**

**Table 5. Heavy metals and microelements content in leaves of *Viscum album* L. sampled on 21.11.2020 in the impact zone of Belinvesttorg-Splav LLC (Beloozersk, Berezovsky district, Brest region), Brest and in the background areas**

Образец (шифр)	Состояние образца*	Расположение от предприятия		Валовое содержание элемента, мг/кг									
		км	сторона горизонта**	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Co	Cr	
ОмБ4	1	0,15	ю-в	54,84	0,48	10,62	105,04	2,32	52,39	121,34	0,29	0,36	
	2			36,74	0,34	10,88	82,44	4,04	78,66	98,80	0,45	2,90	
ОмБ7	1	0,38	ю-в	22,21	0,54	14,57	162,48	9,51	356,76	89,51	0,56	1,72	
	2			9,19	0,49	13,83	161,78	9,00	315,40	64,75	0,48	2,11	
ОмБ1	1	0,30	с-в	10,72	0,28	11,79	113,21	3,63	143,24	66,12	0,59	0,40	
	2			0,67	0,18	8,52	170,37	4,28	209,3	55,57	0,18	1,81	
ОмБ9	1	0,44	с-с-з	4,05	0,21	16,16	366,94	15,07	415,13	116,04	0,93	3,11	
	2			2,74	0,19	14,14	326,75	13,16	355,2	67,64	0,79	1,60	
ОмБ2	1	1,29	ю-з	5,26	0,25	10,91	109,37	3,43	110,25	46,52	0,48	0,30	
	2			0,92	0,13	8,03	166,24	3,39	206,38	52,56	0,18	0,33	
ОмБ3	1	2,80	с-с-з	1,01	0,44	10,89	129,14	5,22	195,63	72,45	0,24	1,90	
	2			0,88	0,34	14,33	156,44	5,34	150,13	59,13	0,49	0,35	
ОмБ6	1	2,40	с-с-з	0,94	0,20	15,09	164,18	1,55	130,82	92,73	0,57	2,16	
	2			0,00	0,18	15,19	168,0	1,68	120,49	76,76	0,46	1,15	
ОмБ8	1	3,47	с-с-з	0,62	0,16	8,31	84,99	5,44	250,33	56,05	0,47	0,44	
	2			0,71	0,20	8,41	99,21	6,23	257,91	42,95	0,49	0,45	
ОмБ5	1	3,92	с-с-з	0,00	0,16	10,49	112,14	6,50	200,63	90,35	0,72	0,78	
	2			0,00	0,14	11,16	105,7	5,97	160,47	80,78	0,54	1,45	
(г. Брест)	1	–	–	2,85	0,24	8,62	149,48	0,81	174,21	73,12	0,22	0,37	
	2			3,38	0,22	8,72	166,84	1,41	143,06	52,77	0,19	1,64	
Фоновая территория (>30 км от источников загрязнения)				0,45	0,12	7,96	134,37	1,08	105,02	78,82	0,30	0,44	

\* 1 – без отмывания; 2 – с отмыванием.

\*\* ю-в – юго-восток; с-в – северо-восток; с-с-з – северо-северо-запад; ю-з – юго-запад.

Наиболее высокие уровни накопления кадмия также отмечаются в юго-восточном секторе в ближнем от предприятия радиусе (до 380 м). Так, на расстоянии 150 м от завода содержание элемента составляет 0,48 мг/кг (4 фоновые величины) и увеличивается до 0,54 мг/кг (4,5 фоновых величин) на удалении в 380 м. При этом, по-видимому, сохраняется возможность заметного аккумулирования кадмия в данном секторе и на более значительных удалениях: в интервале от 380 до 1290 м отсутствовали пункты отбора материала *V. album*, и составить представление о его загрязненности здесь затруднительно.

В север-северо-западном секторе, как правило, не отмечается накопления кадмия в концентрациях, превышающих 2 фоновые величины; оно варьирует в интервале значений 0,16–0,21 мг/кг (за исключением пробы, взятой у костела: ОМБЗ = 0,44 мг/кг).

Эксперименты с отмыванием листьев дистиллированной водой показали, что лишь 20 % кадмия удаляется с их поверхности подобным способом, а 80 % остается в тканях растений. Учитывая, что роль кадмия в биохимических процессах не доказана, столь значительная фиксация элемента может вызвать токсикогенные эффекты в растительном организме.

В целом эффект смываемости установлен для четырех из девяти исследуемых элементов – свинца, железа, кадмия и кобальта (смываемость составила 48,0, 28,2, 20,0 и 16,7 % соответственно), что лишний раз свидетельствует о превалировании в составе выбросов предприятия в воздушную среду двух первых элементов. Смываемость для остальных металлов – меди, цинка, никеля, марганца (биофильная группа), а также хрома – не характерна; варьирование значений до и после процедуры в большинстве определений составляет 4–8 %, что близко к погрешности измерений.

Обращают на себя внимание существенно более высокие уровни содержания некоторых эссенциальных элементов в сравнении с их фоновыми концентрациями. Так, среднее для четырех образцов *V. album* ближнего от предприятия радиуса (до 440 м) для цинка составило 186,92 мг/кг, меди – 13,29, марганца – 241,88 мг/кг, что больше значений, наблюдавшихся в фоновых условиях, в 1,4, 1,7 и 2,3 раза соответственно. Подобная трансформация микроэлементного статуса растения – следствие его развития в стрессовых условиях техногенной среды. Об этом же свидетельствует соотношение Pb/Mn – 22,96/241,88, или 10,5 единиц, – весьма высокий показатель, учитывая, что в условиях фона он изменяется от 0,03 до 0,35 единицы.

С использованием массива данных о содержании Pb в ассимиляционных органах дикорастущих растений, включая *V. album*, были также изучены особенности пространственного распределения аэрогенно обусловленных загрязнений данным металлом (рис. 2).

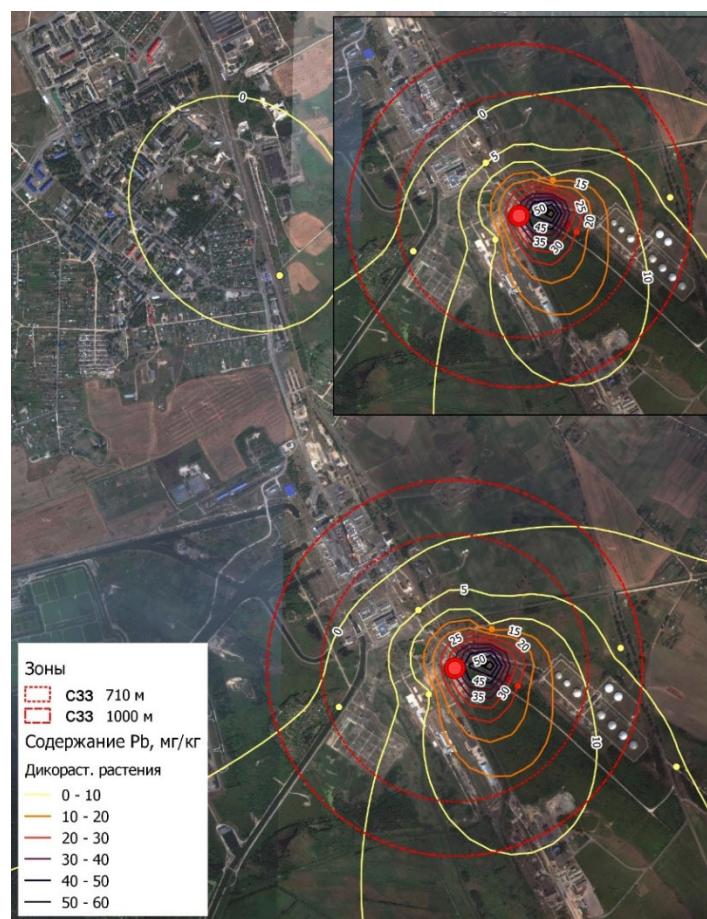
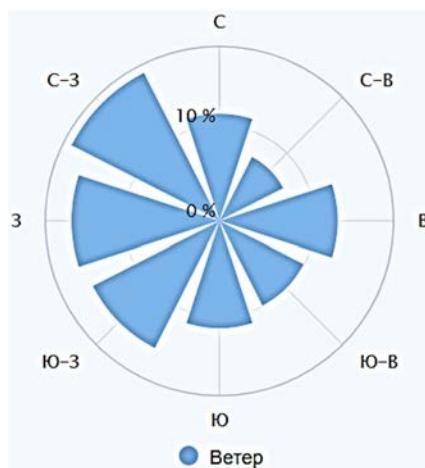


Рис. 2. Пространственное распределение загрязнений свинцом листьев дикорастущих растений (ареал ООО «Белинвестторг-Сплав», г. Белоозерск, Берёзовский район, Брестская область)

Fig. 2. Spatial distribution of lead contamination of leaves of wild-growing plants (areal of Belinvesttorg-Splav LLC, Beloozersk, Berezovsky district, Brest region)

Картосхема дает отчетливое представление об асимметричности пространственного распределения загрязнения свинцом асимиляционных органов растений: наиболее интенсивный характер оно имеет в восток-юго-восточном, юго-восточном и юг-юго-западном направлениях, т. е. согласно розе преобладающих в локации ветров (рис. 3).



**Рис. 3. Роза ветров для Берёзовского района (г. Берёза, Брестская область) с усредненными по году значениями**

**Fig. 3. Wind rose for the Berezovsky district (Bereza, Brest region)  
with year-averaged values**

**Заключение.** проведенное исследование показывает, что в импактной зоне предприятия резко возрастает роль листового (фолиарного) поглощения ТМ и МКЭ из аэральных выпадений; именно этим фактором сегодня определяется пространственная биогеохимическая структура рассматриваемой территории. О преобладании аэрогенного пути загрязнения зеленой массы рассматриваемых культур свидетельствует и тот фактор, что свинцовая специализация предприятия объективно обуславливает превалирование в воздушных выбросах в ряду исследуемых элементов прежде всего соединений свинца, что и наблюдается в действительности; содержание остальных элементов, как правило, остается в рамках фоновых концентраций (за исключением кадмия и в некоторых случаях – никеля).

Установленное аэральное загрязнение свинцом возделываемых сельскохозяйственных растений в С33 ООО «Белинвестторг-Сплав» и на прилегающих землях многократно превышает фоновые и санитарно-гигиенические значения. В ряду изученных дикорастущих видов растений наиболее чувствительными индикаторами аэрогенного загрязнения являются: из числа древесных растений – сосна обыкновенная (хвоя); в группе кустарников и кустарничков – омела белая и малина обыкновенная; среди травянистых растений – крапива двудомная.

Результаты исследований свидетельствуют о необходимости расширения С33 ООО «Белинвестторг-Сплав» как минимум до 1000 м (в особенности – по розе преобладающих ветров) и прекращения сельскохозяйственной деятельности в ее пределах. Руководством Группы компаний 1AK-GROUP и дирекцией завода ООО «Белинвестторг-Сплав» должны быть предприняты меры, направленные на минимизацию выбросов в воздушный бассейн опасных загрязнителей, в первую очередь свинца. Необходимо продолжение исследований, в том числе в области существующей сегодня «теневой экологии», с целью выявления всего спектра загрязняющих веществ и особенностей их поведения в окружающей среде.

#### Список использованной литературы

1. Перельман, А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман, Н. С. Касимов. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1999. – 610 с.
2. Sharma, R. Biological effects of heavy metals: an overview / R. Sharma, M. Agrawal // J. Environ. Biol. – 2005. – Vol. 26, № 3/4. – P. 1–13.
3. Титов, А. Ф. Тяжелые металлы и растения / А. Ф. Титов, Н. М. Казнина, В. В. Таланова. – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2014. – 194 с.

4. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М. : Мир, 1989. – 439 с.
5. Алексеева-Попова, Н. В. Микроэлементный состав растений Полярного Урала в контрастных геохимических условиях / Н. В. Алексеева-Попова, И. В. Дроздова // Экология. – 2013. – № 2. – С. 92.
6. Ветеринарно-санитарные правила обеспечения безопасности кормов, кормовых добавок и сырья для производства комбикормов [Электронный ресурс] : утв. Постановлением Министерства сельского хозяйства и продовольствия Респ. Беларусь, 10 февр. 2011 г., № 10. – Режим доступа: <https://mshp.gov.by/documents/technical-acts/a64bdbfcb9b67c1d.html>. – Дата доступа: 27.10.2022.
7. Добровольский, В. В. Основы биогеохимии : учеб. пособие для геогр., биол., геолог., с.-х. спец. вузов / В. В. Добровольский. – М. : Высшая школа, 1998. – 413 с.
8. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами. – М. : Гидрометеоиздат, 1981. – 109 с.
9. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства / А. В. Кузнецов [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : ЦИНАО, 1992. – 53 с.
10. Миклишанский, А. З. О формах нахождения химических элементов в атмосфере: распределение элементов между парами атмосферной влаги и аэрозолем в приземных слоях атмосферы / А. З. Миклишанский, Ю. В. Яковлев, Б. В. Савельев // Геохимия. – 1978. – № 1. – С. 3–10.
11. Вступ до медичної геології / за ред. Г. І. Рудька, О. М. Адаменка. – К. : Академпрес, 2010. – Т. 2. – 448 с.
12. Ильин, В. Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение / В. Б. Ильин. – Новосибирск : Наука, 1991. – 151 с.
13. Натаров, В. М. Комплексный геохимический фоновый мониторинг в Березинском биосфера заповеднике / В. М. Натаров, О. В. Лукашев, В. В. Савченко. – Минск : Белорусский дом печати, 2013. – 214 с.
14. Тяжелые металлы в системе почва – растение – удобрение / М. М. Овчаренко [и др.]. – М. : Пролетарский светоч, 1997. – 290 с.
15. Елпатьевский, П. В. Геохимия ландшафта и техногенез / П. В. Елпатьевский, В. С. Аршанова. – М. : Наука, 1990. – 196 с.
16. Ильин, В. Б. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах Новосибирской области / В. Б. Ильин, А. И. Сысо. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001. – 229 с.

### References

1. Perelman A. I., Kasimov N. S. *Geohimiya landshafta* [Geochemistry of landscape]. Moscow, Moscow State University Press Publ., 1999, 610 p. (in Russian)
2. Sharma R., Agrawal M. Biological effects of heavy metals: An overview. *J. Environ. Biol.*, 2005, Vol. 26, no. 3/4, pp. 1–13.
3. Titov A. F., Kaznina N. M., Talanova V. V. *Tyazelie metalli i rasteniya* [Heavy metals and plants]. Petrozavodsk, Karelian Research Center of RAS Publ., 2014, 194 p. (in Russian)
4. Kabata-Pendias A., Pendias X. *Mikroelementi v pochvah i rasteniyah* [Microelements in soils and plants]. Moscow, Mir Publ., 1989, 439 p. (in Russian)
5. Alekseeva-Popova N. V., Drozdova I. V. *Mikrolementni sostav rastenii Polyarnogo Urala v kontrastnih geo-himcheskih usloviyah* [Micronutrient composition of plants in the Polar Urals in contrasting geochemical conditions]. *Ekologiya = Ecology*, 2013, no. 2, pp. 92. (in Russian)
6. Veterinarno-sanitarnie pravila obespecheniya bezopasnosti kormov, kormovih dobavok i siriya dlya proizvodstva kombikormov: utv. Postanovleniem Ministerstva selskogo hozyaistva i prodovolstviya Resp. Belarus, 10 fevralya 2011 g., № 10 [Veterinary and sanitary rules to ensure the safety of feeds, feed additives and raw materials for the production of mixed fodder : approved by the Decision of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus from February 10, 2011, № 10]. Available at: <https://mshp.gov.by/documents/technical-acts/a64bdbfcb9b67c1d.html> (accessed 27 October 2022). (in Russian)
7. Dobrovolskiy V. V. *Osnovi biogeohimii: ucheb. posobie dlya geogr., biol., geolog., s.-h. spez. vuzov* [Fundamentals of biogeochemistry: textbook for geological, biological, geological, agricultural specialties of universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1998, 413 p. (in Russian)
8. *Metodicheskie recomendazii po provedeniyu polevih i laboratornih issledovanii pochv i rastenii pri kontrole zagryazneniya ocruzayuchei sredi metallami* [Methodical Recommendations on Field and Laboratory Investigations of Soils and Plants in Controlling Environmental Pollution by Metals]. Moscow, Hydrometeoizdat Publ., 1981, 109 p. (in Russian)
9. Kuznetsov A. V. [et al]. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazelih metallov v pochvah selskohozyaitvenni ugodii i produkzii rastenievodstva* [Methodical guidelines for the determination of heavy metals in the soils of agricultural land and crop products]. Moscow, CINAO Publ., 1992, 53 p. (in Russian)
10. Miklishansky A. Z., Yakovlev Y. V., Savelyev B. V. *O formah nahozdeniya himicheskikh elementov v atmosfere: raspredelenie elementov mezdu parami atmosfernoi vlagi i aerozolem v prizemnih sloyakh atmosferi* [On forms of chemical elements in the atmosphere: distribution of elements between atmospheric moisture vapor and aerosol in surface atmospheric layers]. *Geohimiya = Geochemistry*, 197, no. 1, pp. 3–10. (in Russian)
11. Rudka G. I., Adamenko O. M. *Vstup do metodichnoi geologii* [Introduction to medical geology]. Kiev, Publishing house Academpres, 2010, vol. 2, 448 p. (in Ukrainian)

12. Ilyin V. B. *Tyazeliie metalli v sisteme pochva – rastenie* [Heavy metals in the system soil – plant]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991, 151 p. (in Russian)
13. Natarov V. M., Lukashev O. V., Savchenko V. V. *Kompleksni geohimicheskii fonovii monitoring v Berezinskem biofernem zapovednike* [Complex geochemical background monitoring in the Berezina Biosphere Reserve]. Minsk, Belarusian Printing House, 2013, 214 p. (in Russian)
14. Ovcharenko M. M., Shilnikov G. G., Vendilo N. I. [et al.] *Tyazeliie metallic v sisteme pochva – rastenie – udobrenie* [Heavy metals in the system soil – plant – fertilizer]. Moscow, Proletarian Svetoch Publ., 1997, 290 p. (in Russian)
15. Elpatyevsky P. V., Arshanova V. S. *Geohimiya landshafta i tehnogenез* [Geochemistry of Landscape and Technogenesis]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 196 p. (in Russian)
16. Ilyin V. B., Syso A. I. *Microelementi i tyazeliie metallic v pochvah Novosibirskoi blasti* [Microelements and heavy metals in the soils of the Novosibirsk region]. Novosibirsk, Publishing house of Siberian Branch of RAS, 2001, 229 p. (in Russian)

#### Информация об авторах

Николай Васильевич Михальчук – кандидат биологических наук, доцент, директор, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларусь (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, Брест, Беларусь). E-mail: info@paei.by

Елена Александровна Брыль – ученый секретарь, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларусь (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, Брест, Беларусь). E-mail: info@paei.by

#### Information about the authors

Nikolai V. Mikhalchuk – Ph. D. (Biological), Associate Professor, Director, Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus (41, Sovietskich Pogranichnikov St., 224030, Brest, Belarus). E-mail: info@paei.by

Alena A. Bryl – Scientific Secretary, Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus (41, Sovietskich Pogranichnikov St., 224030, Brest, Belarus). E-mail: info@paei.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-2-136-144>

УДК 504.054

Поступила в редакцию 29.09.2022

Received 29.09.2022

## СТОЙКИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ В БЕЛАРУСИ: ИСТОЧНИКИ, ЗАПАСЫ, РЕГУЛИРОВАНИЕ

Т. И. Кухарчик, С. В. Какарека, М. И. Козыренко,  
В. Д. Чернюк, А. В. Крылович

*Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Статья посвящена результатам изучения в Беларуси химических веществ, дополнительно включенных в Стокгольмскую конвенцию о стойких органических загрязнителях (СОЗ), – «новых» СОЗ. Показаны особенности «новых» СОЗ и проблемы их выявления и идентификации. Кратко охарактеризована ситуация с промышленными химикатами на основе «новых» СОЗ в Беларуси, выявленные или потенциальные сферы применения полибромдифениловых эфиров, пер- и полифторированных соединений, короткоцепных хлорированных парафинов, полихлорированных нафталинов и других СОЗ. Приведены оценки техногенных потоков полибромдифениловых эфиров в составе полимерных отходов электрического и электронного оборудования, включающие объемы их ежегодного образования на территории Беларуси. Приведен перечень научно-методических и нормативных технических документов регулирования СОЗ в Беларуси, разработанных в рамках выполнения ряда мероприятий Государственных научно-технических программ, Национальных планов и подпрограммы по обращению с СОЗ. Определены приоритетные меры экологически безопасного обращения с СОЗ, дополнительно включенными в Конвенцию, а также основные направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** стойкие органические загрязнители; полибромдифениловые эфиры; гексабромциклогидодекан; перфторированные и полифторированные соединения; электрическое и электронное оборудование; отходы пластика.

**Для цитирования.** Кухарчик Т. И., Какарека С. В., Козыренко М. И., Чернюк В. Д., Крылович А. В. Стойкие органические загрязнители в Беларуси: источники, запасы, регулирование // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 136–144.

## PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS IN BELARUS: SOURCES, STOCKPILES, REGULATION

Т. И. Кухарчик, С. В. Какарека, М. И. Казыренка,  
В. Д. Чернюк, А. В. Крылович

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** The article is devoted to the results of the study in Belarus of the chemicals, additionally included in the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs) – ‘new’ POPs. The features of ‘new’ POPs and the problems of their identification are shown. The situation with industrial chemicals based on ‘new’ POPs in Belarus, including polybromodiphenyl esters, per- and polyfluorinated compounds, short-chain chlorinated paraffins, polychlorinated naphthalenes and other POPs is briefly described. Estimates of technogenic flows of polybromodiphenyl ethers in the composition of polymer waste of electrical and electronic equipment, including the volume of their annual formation on the territory of Belarus, are given. The list of scientific and methodological and regulatory technical documents for the regulation of POPs in Belarus, developed as part of the implementation of a number of activities of State scientific and technical programs, National plans and subprograms on the management of POPs, is given. Priority measures for the environmentally sound management of POPs, additionally included in the Convention, as well as the main directions of further research are identified.

**Keywords:** persistent organic pollutants; polybromodiphenyl ethers; hexabromocyclododecane; perfluorinated and polyfluorinated compounds; electrical and electronic equipment; plastic waste.

**For citation.** Kukharchyk T. I., Kakareka S. V., Kazyrenka M. I., Chernyuk V. D., Krylovich A. V. Persistent organic pollutants in Belarus: sources, stockpiles, regulation. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 136–144.

**Введение.** Два десятилетия назад, в 2001 г., была подписана Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях (СОЗ), ознаменовавшая собой новую эпоху экологически безопасного обращения с опасными веществами. Первоначально речь шла о так называемой «грязной дюжине», включающей диоксины и фураны, ДДТ, полихлорированные бифенилы и ряд других химических веществ, в отношении которых были выявлены свойства токсичности, устойчивость к разложению, способность к биоаккумуляции в жиро содержащих тканях и переносу на большие расстояния. Выявленные негативные последствия воздействия СОЗ на природные экосистемы и здоровье человека, включая определенное их воздействие через загрязненные территории, привели к осознанию необходимости координации усилий всего международного сообщества. Сторонами Стокгольмской конвенции о СОЗ, принявшими на себя обязательства и тем самым подтвердившими намерения в отношении регулирования СОЗ на глобальном уровне, являются 185 стран, представляющих все регионы Земного шара.

Республика Беларусь как Сторона Стокгольмской конвенции с 2004 г. взяла на себя международные обязательства по решению различных проблем, связанных с СОЗ, в том числе с химическими веществами, дополнительно включенными в Конвенцию. Принятые конференциями Сторон дополнения вступают в силу в стране автоматически примерно через год после их размещения в Депозитарии.

В Институте природопользования НАН Беларусь изучение СОЗ было начато в конце 1990-х гг., что соответствовало возросшему общему интересу к СОЗ на мировом уровне в связи с подготовкой Конвенции. Инициативы Института, получившие поддержку Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, первоначально были связаны с непреднамеренными выбросами диоксинов/фуранов (ПХДД/Ф), полихлорированных бифенилов (ПХБ) и гексахлорбензола (ГХБ), а также с такой группой промышленных химикатов, как ПХБ. Географически исследования охватывали не только территорию Беларуси, но и страны постсоветского пространства. Результаты исследований нашли отражение в ряде научных статей и монографий и обобщены в работе [1].

В дальнейшем исследования развивались с учетом дополнительно включенных химических веществ, что было обусловлено необходимостью создания и (или) обновления научно-информационной базы для их эффективного управления. Первые шаги в отношении химических веществ, дополнительно включенных в Стокгольмскую конвенцию о СОЗ, в Институте были предприняты в 2011 г. в рамках ГНТП «Природные ресурсы и окружающая среда» (2011–2015) и продолжились при выполнении заданий в рамках ГНТП «Природопользование и экологические риски» (2016–2020), Национального плана выполнения обязательств, принятых Республикой Беларусь по реализации положений Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях (2011–2015) и подпрограммы 3 «Обращение со стойкими органическими загрязнителями» комплексной Государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» (2016–2020). В настоящее время реализуется ряд проектов в составе ГНТП «Зеленые технологии ресурсопользования и экобезопасности» (2021–2025) и подпрограммы 3 «Обращение со стойкими органическими загрязнителями» комплексной Государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» (2021–2025).

Данная статья акцентирует внимание на некоторых результатах работ в Институте природопользования, которые касаются ситуации с промышленными химикатами на основе СОЗ в Беларуси, проблемами и перспективами их изучения и регулирования. В ходе исследований использованы документы и отчеты Секретариата Стокгольмской конвенции о СОЗ и Базельской конвенции, Директивы ЕС, законодательные документы других стран, техническая, справочная и научная литература, данные Государственного таможенного комитета, результаты выборочных запросов на промышленные предприятия, а также химико-аналитических испытаний проб пластика.

**Особенности «новых» СОЗ.** Список СОЗ за прошедшее после подписания Конвенции время значительно расширился и насчитывает 31 наименование, 19 из которых были включены дополнительно в период с 2009 по 2022 г. Как и ранее, большинство химических веществ (28 наименований) включены в Приложение А и подлежат экологически безопасному удалению, хотя сроки такого удаления варьируют в зависимости от наличия или отсутствия конкретных исключений в отношении производства и потребления «новых» СОЗ (см. таблицу).

Включение новых веществ и соединений в Конвенцию значительно усложнило введение экологически безопасных методов обращения, включающих процедуры их выявления, учета, мониторинга, удаления и т. д. Это связано не столько с увеличением количества СОЗ, требующих принятия природоохранных мер, сколько с расширением перечня материалов, изделий и отходов, в которых они могут содержаться, многообразием и особенностями сфер применения, в том числе для бытовых целей. Помимо хлорсодержащих, в Конвенцию включены некоторые бром- и фторсодержащие СОЗ.

Указанные вещества/соединения обладают различными свойствами и особенностями поведения в окружающей среде, растворимостью, липофильностью, миграционными и другими характеристиками. Отличительная особенность промышленных химикатов на основе «новых» СОЗ – их нахождение

в готовых изделиях в качестве примесей и добавок. Они могут содержаться в различных видах полимерных материалов, лаках и красках, обработанных тканях, промышленных и бытовых химических препаратах, пенообразователях для пожаротушения, замазках, моторных маслах и других видах изделий. Сфера применения СОЗ-содержащих материалов чрезвычайно широка: в промышленности, строительстве, на транспорте и в бытовом секторе. Как правило, их содержание в конечной продукции варьирует от сотых долей процента до нескольких процентов. При этом огромное количество материалов/изделий, в которых могут присутствовать СОЗ, используется населением для бытовых целей и после окончания срока службы приобретает статус бытовых отходов, разделение которых отсутствует либо осуществляется по типу субстрата. Срок службы материалов/изделий, в которых могут присутствовать СОЗ, составляет до 10 лет и более; это означает, что техническая документация (даже при ее наличии) может быть утеряна. Соответственно, процесс выявления и идентификации таких изделий и регулирования обращения с отходами, в которые они превращаются по окончании срока службы, намного сложнее по сравнению с химическими веществами, которые используются практически в чистом виде.

**Химические вещества, дополнительно включенные в Приложение А  
Стокгольмской конвенции о СОЗ в период с 2009 по 2022 г.**

**Chemicals additionally included in Annex A of the Stockholm Convention on POPs  
in the period from 2009 to 2022**

Год включения	Приложение А	
	без исключений	с исключениями
2009	Альфа-гексахлорциклогексан (решение SC-4/10) Бета-гекса-хлорциклогексан (решение SC-4/11) Гексабромдифенил (решение SC-4/13) Пентахлорбензол (решение SC-4/16) Линдан (решение SC-4/15) Хлордекон (решение SC-4/14)	Гексабромдифениловый эфир и гептабромдифениловый эфир (решение SC-4/14) Тетрабромдифениловый эфир и пентабромдифениловый эфир (решение SC-4/18)
2011	–	Технический эндосульфан (решение SC-5/3)
2013	–	Гексабромциклогексан (решение SC-6/13)
2015	Гексахлорбутадиен (решение SC-7/12)	Пентахлорфенол, его соли и эфиры (решение SC-7/13), Ди-, три-, тетра-, пента-, гекса-, гепта- и октаклорированные нафталины (решение SC-7/14)
2017	–	Декабромдифениловый эфир (решение SC-8/10) Короткоцепные хлорированные парафины (решение SC-8/11)
2019	Дикофол (решение SC-7/13)	Перфтороктановая кислота (ПФОК), ее соли и родственные ПФОК соединения (решение SC-7/13)
2022	Перфторгексановая сульфоновая кислота (ПФГСК), ее соли и родственные ПФГСК соединения (решение SC-10/13)	–

Список СОЗ будет расширяться и дальше по мере выявления характерных для СОЗ свойств поведения в окружающей среде и эффектов воздействия на экосистемы и здоровье человека. Это свидетельствует о важности развития научно-методической базы их идентификации и учета.

**Научно-методические основы выявления и инвентаризации «новых» СОЗ.** Как известно, выявление, идентификация и инвентаризация СОЗ являются неотъемлемым элементом системы экологически безопасного управления опасными веществами. Для разработки планов управления новыми СОЗ с целью выполнения принятых международных обязательств необходимы данные об объемах их использования в стране, сферах и характере использования, видах материалов/изделий, их содержащих, местах хранения отходов и многие другие.

С учетом ряда руководств, разработанных под эгидой Стокгольмской конвенции о СОЗ, и на основании опыта зарубежных стран нами, по мере включения «новых» СОЗ в Конвенцию, были подготовлены вначале ТКП 17.11-06-2012 (02120), а затем – методические рекомендации, касающиеся проведения инвентаризации как собственно химикатов на основе СОЗ, так и изделий, оборудования или отходов, в которых они могут содержаться [2, 3].

Основными принципами выявления химических веществ, дополнительно включенных в Стокгольмскую конвенцию о СОЗ, являются:

- приоритетность выявления промышленных химикатов на основе СОЗ (объемов их поступления в страну и объемов использования);
- приоритетность рассмотрения наиболее вероятных сфер использования СОЗ и кандидатов в СОЗ;
- сочетание экспертных оценок потенциальных запасов «новых» СОЗ и их инвентаризации на промышленных предприятиях;
- оценка достоверности и полноты информации при выявлении промышленных химикатов на основе «новых» СОЗ / кандидатов в СОЗ, подтверждаемая соответствующими данными.

Для выявления промышленных химикатов на основе СОЗ подготовлены перечни прямых индикационных признаков, включающих помимо их наименований, номеров CAS следующее: маркировку, заводские ярлыки, непосредственно указывающие на содержание химических веществ; информацию о присутствии химических веществ в промышленных химикатах и (или) изделиях/материалах, приведенную в технических паспортах, паспортах безопасности или других сопроводительных документах производителя и (или) поставщика; результаты химико-аналитических определений. В Методических рекомендациях [2, 3] даны перечни индикационных признаков/характеристик промышленных продуктов, изделий и материалов, содержащих СОЗ, перечни торговых наименований продукции, основных производителей, иная полезная информация.

**Поступление «новых» СОЗ.** Исследования показали, что количественно оценить поступление большинства «новых» СОЗ в Беларусь на основании таможенной статистики проблематично в связи с отсутствием соответствующих кодов ТН ВЭД ЕАЭС либо по причине одновременного учета под одним кодом нескольких наименований. В частности, не предусмотрены коды для промышленных химикатов на основе ПХФ, ПХН, ГХБД, ГБД, ГБЦД, КЦХП, ПФОК, ПФГСК, их солей и родственных соединений. С учетом запретов и ограничений, принятых в рамках Конвенции, а также действующих во многих странах, поступление в Беларусь таких СОЗ, как ПХФ, ПХН, ГХБД, ГБЦД, представляется маловероятным, за исключением случаев импорта товаров и изделий, их содержащих. Это в первую очередь касается ГБЦД в составе полистирола вспенивающегося. Поступление ПФОК и ПФГСК возможно со фторполимерами и фторэластомерами, КЦХП – с хлорированными парафинами. Учет поступления к-декабДЭ в таможенной статистике осуществляется под одним кодом с декабромифенилэтаном и бис-2,3-дibromopropilovym эфиром тетрабромбисфенола А.

Лишь в отношении к-пентаБДЭ и ПФОС имеются количественные данные об их импорте и экспорте. Объем поступления к-пентаБДЭ в Беларусь за период с 2003 по 2008 г. составил 407 т. Единственной страной-импортером к-пентаБДЭ являлся Китай. Экспорт к-пентаБДЭ в 2003–2005 гг. достиг 176,6 т. С 2017 г. введены коды для ПФОС и ее солей. Согласно полученным данным, в 2018 г. в Беларусь импортировано 752 кг ПФОС, в 2019 г. – 10 кг солей ПФОС.

**Применение «новых» СОЗ в производственных процессах.** В результате проведенных исследований установлено, что к-декабДЭ в виде антиприена FR-1210 использовали для производства термостойких полизэфирных композиционных материалов «Белтер». Объемы его применения в 2014 г. составили 6,2 т, в 2016 г. – 3,2 т. Содержание декабДЭ в готовой продукции оценивается примерно в 7,4 %, что соответствует диапазону бромированных антиприренов в пластмассах, предназначенных для электрического и электронного оборудования (ЭЭО) [4]. Не исключено использование других материалов, при производстве которых применялся декабДЭ. Потребителями композиционных материалов с антиприреновой добавкой, в свою очередь, являются предприятия по производству электротехнических приборов.

Что касается других СОЗ, то можно говорить лишь о потенциальных сферах их применения, основываясь на данных импорта, видах продукции, других данных. Так, в Беларуси выпускаются некоторые виды фторсодержащей продукции: фторсодержащий пенообразователь для тушения горючих жидкостей; фторуглеродная водная дисперсия для обработки тканей; фторсодержащие композиционные материалы для машиностроения. В каждом из указанных процессов не исключается применение (в прошлом или в настоящее время) пер- и полифторированных соединений, в том числе включенных в перечень СОЗ. Предполагается, что применяемые в Беларуси фторированные ПАВ соответствуют торговому продукту Forafac®1157, который применяется также в России и ряде Европейских стран [5]. Основной компонент Forafac®1157 – 6:2 фортеломер сульфонамид алкилбетаин (6:2 FTAB); также

включает смеси гомологов С6/С8. На ряде предприятий имеются запасы фторсодержащего пенообразователя «Барьер пленкообразующий», общий объем которого в 2018 г. оценивался в 116 т. Производство фторсодержащей водной дисперсии осуществляется с использованием фторуглеродной смолы, которая относится к длинноцепным соединениям. Это препараты Муссон МВО-1 и Муссон МВО-2, предназначенные для придания масло-, водо- и грязеотталкивающих свойств тканям, а также для производства специальных защитных тканей.

Полученные результаты свидетельствуют о содержании ГБЦД в составе полистирола вспенивающегося, поступающего из России, Китая и других стран; его концентрация варьирует от 0,6 до 1,0 %. Всего за период с 2000 по 2017 г. в страну было ввезено более 190 тыс. т вспенивающегося полистирола, экспортано – менее 4 тыс. т. С учетом полученных ранее оценок [6] возможные запасы ГБЦД в составе полистирола вспенивающегося могут варьировать в диапазоне от 1,14 тыс. до 1,86 тыс. т.

В отношении ПХН установлено, что их не использовали и не используют в Беларуси при производстве красок и растворителей, кабелей, герметиков, в гальванических процессах, а также при производстве резинотехнических изделий. На основании анализа технической документации, включая архив патентов на изобретения и технические условия, установлено, что полихлорнафталины (галовакс) производили в бывшем СССР; при этом технические условия действовали до 1991 г. Галовакс применяли при производстве бумажных радиоконденсаторов и пусковых конденсаторов для двигателей автомобилей, а также для пропитки обмоток трансформаторов и дросселей низкой частоты. Информация относится к продукции, выпускавшейся на территории бывшего СССР в 1940–50-е гг. Кроме того, галовакс применяли в качестве флегматизатора при производстве взрывчатых веществ; годы применения неизвестны. К тому же, ПХН может содержаться в диэлектриках на основе ПХБ в качестве примеси, а также в этиловой жидкости, которая входит в состав авиационного бензина.

Потенциальными сферами применения хлорированных парафинов (смесей промышленных химикатов, которые могут включать короткоцепные соединения) являются предприятия по производству резинотехнических изделий, пластмасс, лакокрасочной продукции.

Результаты оценки ситуации с химическими веществами в Беларуси, дополнительно включенными в Стокгольмскую конвенцию о СОЗ в 2009–2019 гг., опубликованы в работе [7], а также использованы делегатами Республики Беларусь на 7–9-й конференциях Сторон для обоснования позиции страны при рассмотрении «новых» СОЗ с точки зрения их включения в Приложения А, В, С Конвенции.

**Изучение содержания ПБДЭ в пластике ЭЭО и оценки их запасов.** Все более актуальным для выявления СОЗ-содержащих отходов и материалов является использование химико-аналитических методов [8], что особенно востребовано для полимерных отходов ЭЭО, при производстве которых широко использовали бромированные антиприрены на основе полибромдифениловых эфиров (ПБДЭ), в том числе к-октаБДЭ и к-декаБДЭ.

Как известно, проблема управления отходами ЭЭО связана с необходимостью переработки вторичного сырья в соответствии с принципами зеленой экономики и целями Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 г., а также с необходимостью их разделения, чтобы избежать рециркуляции загрязняющих веществ, включая ПБДЭ [9]. К настоящему времени получены доказательства экологических угроз, возникающих при вторичной переработке загрязненных отходов и обусловленных поступлением опасных веществ в товары повседневного спроса, детские игрушки, материалы, контактирующие с продуктами питания [10, 11], и их поступления в организм человека [12].

В Беларуси пока отсутствует система учета отходов ЭЭО. До недавнего времени не выполнялись измерения содержания ПБДЭ. Поэтому для оценки запасов бромсодержащего и ПБДЭ-содержащего пластика потребовалось определение объемов ежегодно образующихся отходов ЭЭО, включая полимерные фракции, а также отбор проб и химико-аналитические исследования.

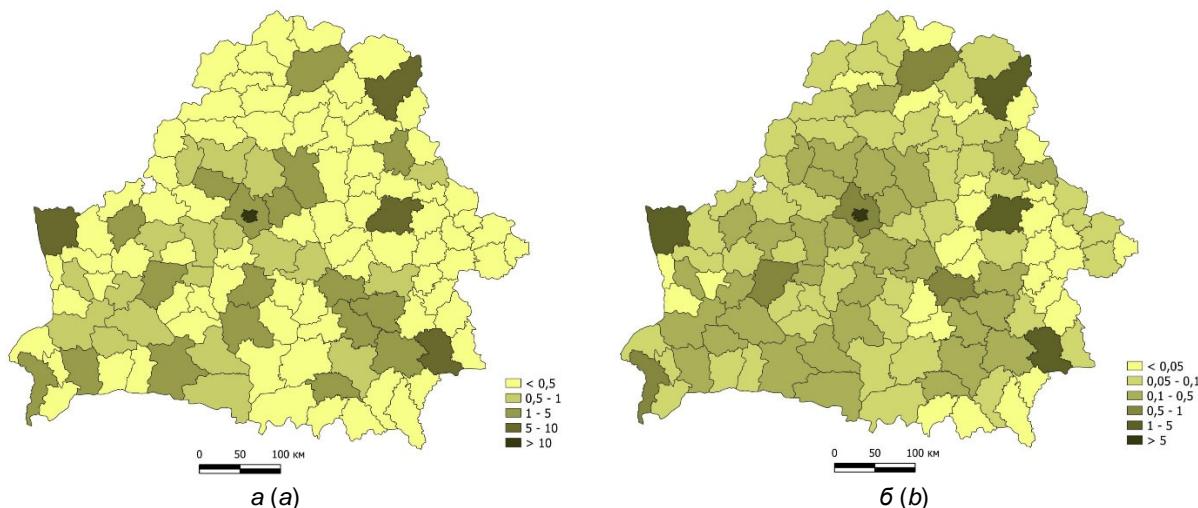
Первые данные о содержании ПБДЭ в полимерных материалах отходов ЭЭО, образующихся на территории Беларуси, были получены в 2020 г. при поддержке исследовательской лаборатории RECETOX (Чехия) [13]. В последующем использовался потенциал аккредитованной испытательной лаборатории «БЕЛЛИС». К настоящему времени отобрано и проанализировано около 750 проб пластика с определением содержания брома и примерно 270 проб бромсодержащего пластика с определением ПБДЭ. Общие подходы к отбору проб и химико-аналитическим определениям представлены в статье [14].

Согласно полученным результатам, бром обнаруживается в 36,4 % проанализированных проб, ПБДЭ – примерно в 10 %. Во всех случаях преобладающим конгенером является декаБДЭ.

Для оценки образования полимерных отходов ЭЭО, содержащих ПБДЭ, использована методика, одобренная Конференцией Сторон Стокгольмской конвенции о СОЗ [15, 16]. Расчеты проведены по состоянию на 2020 г. За основу для расчетов взяты данные Национального статистического комитета по обеспеченности населения предметами длительного пользования, а также данные проведенного в 2018 г. анкетирования населения.

Выполненные расчеты показали, что по состоянию на 2020 г. в Беларуси образуется около 128 тыс. т отходов ЭЭО, из которых около 20,3 % приходится на долю полимерных отходов (25,9 тыс. т). Наибольшие объемы полимерных отходов (44,8 % общего их количества) образуются от крупной бытовой техники. На телевизоры и мониторы приходится 29,3 %, информационное и телекоммуникационное оборудование – 11,4 %, мелкую бытовую технику – 10,2 % всех полимерных отходов ЭЭО.

Построенные картосхемы распределения объемов образования отходов ЭЭО, а также их полимерной фракции свидетельствуют о значительной пространственной неоднородности (см. рисунок). 23,6 % всех отходов ЭЭО приходится на долю г. Минска. 32,2 % отходов ЭЭО образовалось в районах с крупными городами областного подчинения – Брестском, Барановичском, Пинском, Витебском, Полоцком, Гомельском, Гродненском, Смолевичском и Могилёвском. В трех районах – Борисовском, Минском, Оршанском – объемы образования отходов ЭЭО превышали 2 тыс. т, а их сумма составила 6 % всех отходов ЭЭО в стране. В целом примерно 50 % общего объема образования таких отходов приходится на г. Минск и областные города. На 11 административных районов и г. Минск приходится 64 % общего объема полимерных отходов, тогда как на оставшиеся 107 районов – 36 %.



**Объемы образования отходов ЭЭО (а) и полимерных фракций отходов ЭЭЭ (б) на территории Беларуси, тыс. т (по состоянию на 2020 г.)**

**Volumes of formation of EEE waste (a) and polymer fractions of EEE waste (b) on the territory of Belarus, thousand tons (as of 2020)**

Установлено, что по состоянию на 2020 г. на территории Беларуси 22,3 %, или 5,7 тыс. т, отходов пластика ЭЭО относятся к бромсодержащим. Наибольшее количество бромсодержащего пластика появляется от экранов (мониторов и телевизоров). От крупной бытовой техники образуется примерно 1,3 тыс. т бромсодержащего пластика, информационного и телекоммуникационного оборудования – 0,7 тыс., копировального оборудования – 0,34 тыс. и мелкой бытовой техники – 0,3 тыс. т. Объемы полимерных отходов ЭЭО, содержащие в своем составе бром в концентрациях более 2000 мг/кг, оцениваются в более чем 3,5 тыс. т, что составляет 62 % всего бромсодержащего пластика ЭЭО, или 14 % от всех отходов пластика ЭЭО, образовавшихся за год.

С учетом относительно невысокой доли отходов ЭЭО (примерно 20 %), поступающих на переработку, можно предположить значительное их рассеяние в окружающей среде, в том числе при поступлении на полигоны отходов и накоплении/хранении у населения.

**Регулирование обращения с «новыми» СОЗ.** Как было отмечено выше, для многих СОЗ Конвенцией предусмотрены конкретные исключения, которыми могут воспользоваться Стороны после соответствующей процедуры регистрации. Данное обстоятельство, а также разные национальные процедуры вступления в силу дополнений, предполагающих их ратификацию, способствуют продолжению производства и применения ряда «новых» СОЗ в некоторых странах. Поэтому крайне важным является совершенствование законодательной и нормативной технической базы, касающейся производства, импорта/экспорта «новых» СОЗ, обращения с отходами и т. д.

За прошедшие после присоединения к Стокгольмской конвенции о СОЗ годы в Беларуси и на территории стран Евразийского экономического союза достигнуты определенные успехи в решении

ряда вопросов, касающихся СОЗ. В первую очередь это относится к химическим веществам, первоначально включенным в Приложения А, В, С к Конвенции: ПХБ, диоксинов/фуранов, ГХБ и хлорорганических пестицидов. В части, касающейся «новых» СОЗ, можно отметить следующие важные решения:

– с 1 января 2017 г. внесены изменения в классификатор товаров ТН ВЭД ЕАЭС, которые затрагивают в том числе ПФОС и ее соли;

– с 2018 г. вступил в силу Технический регламент «Об ограничении применения опасных веществ в изделиях электротехники и радиотехники» (ТР ЕАЭС 037/2016), лимитирующий содержание ПБДЭ в изделиях электротехники и радиоэлектроники (не более 0,1 % от массы однородного вещества);

– с 15 марта 2022 г. Решением Коллегии ЕЭК обновлен список средств защиты растений и других СОЗ, запрещенных к ввозу, с добавлением ряда «новых» СОЗ – альфа-гексахлорциклогексана, бета-гексахлорциклогексана, хлордекона, линдана, технического эндосульфана;

– в 2022 г. в Институте природопользования завершена разработка проектов двух нормативных технических актов, в том числе ТКП 17.11-11-20XX (33140) «Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Правила обращения с отходами электрического и электронного оборудования, содержащими полибромированные дифениловые эфиры» и ТКП 17.11-12-20XX (33140) «Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Правила обращения с отходами полистирола, содержащими или потенциально содержащими гексабромциклогексан».

**Заключение.** За истекшие годы проведена значительная работа по инвентаризации и регулированию СОЗ, однако многие вопросы еще требуют решения. Среди приоритетных мер – введение ограничений на применение промышленных химикатов на основе «новых» СОЗ и их продажу. Учитывая большой список химических веществ в категории «новые» СОЗ, целесообразно введение их регулирования с учетом принципа общности свойств, как это было показано в документах [17, 18] в отношении пер- и полифторированных соединений.

Необходимо установление норм содержания СОЗ в отходах, подлежащих экологически безопасному регулированию с учетом руководящих принципов, подготовленных под эгидой Стокгольмской и Базельской конвенций, и рекомендованных Конференциями Сторон [19]. Кроме того, требуется совершенствование классификатора отходов с включением отходов, содержащих «новые» СОЗ.

Важным представляется развитие химико-аналитической базы определения «новых» СОЗ, что позволит, в частности, существенно повысить точность инвентаризации их объемов и запасов.

Целесообразны как активизация научных исследований с оценкой уровней загрязнения окружающей среды «новыми» СОЗ, так и изучение их поведения в зависимости от природных и антропогенных факторов и оценки экологической опасности.

#### Список использованных источников

1. Какарека, С. В. Источники поступления стойких органических загрязнителей в окружающую среду: опыт выявления и изучения / С. В. Какарека, Т. И. Кухарчик // Природопользование. – Минск, 2012. – Вып. 22. – С. 157–164.
2. Методические рекомендации по выявлению и оценке запасов химических веществ, дополнительно включенных в Стокгольмскую конвенцию о СОЗ / Т. И. Кухарчик [и др.]. – Минск : Минсктипроект, 2013. – 44 с.
3. Кухарчик, Т. И. Методические рекомендации по выявлению и оценке запасов химических веществ, включенных в Стокгольмскую конвенцию о СОЗ в 2011 г. и 2013 г. и находящихся на рассмотрении как кандидаты в СОЗ / Т. И. Кухарчик, С. В. Какарека, М. И. Козыренко ; Государственное научное учреждение «Институт природопользования Национальной академии наук Беларусь». – Минск : Институт природопользования, 2015. – 52 с.
4. Hansen, E. Hazardous substances in plastics / E. Hansen, N. Nilsson, K. S. R. Vium // Survey of chemical substances in consumer products. – Denmark, The Danish Environmental Protection Agency, 2014. – №. 132. – 182 р.
5. Лахвич, В. В. Исследование свойств пленкообразующих пенообразователей для тушения горючих жидкостей / В. В. Лахвич, Г. И. Вариков // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2014. – № 1 (19). – С. 73–81.
6. Кухарчик, Т. И. Использование гексабромциклогексана в Беларуси, проблемы выявления и предотвращения поступления в окружающую среду / Т. И. Кухарчик, М. И. Козыренко // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2016. – № 1. – С. 74–81.
7. Справочно-информационный бюллетень о химических веществах в Беларуси, дополнительно включенных в Стокгольмскую конвенцию о СОЗ в 2009–2019 годах / Т. И. Кухарчик [и др.] // Государственное научное учреждение «Институт природопользования Национальной академии наук Беларусь». – Минск : Институт природопользования, 2020. – 52 с.
8. Towards development of a rapid and effective non-destructive testing strategy to identify brominated flame retardants in the plastics of consumer products / C. Gallen [et al.] // Science of the Total Environment. – 2014. – Vol. 491–492. – P. 255–265. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.01.074

9. Wagner, S. Legacy additives in a circular economy of plastics: Current dilemma, policy analysis, and emerging countermeasures / S. Wagner, M. Schlummer // Resources, Conservation and Recycling. – 2020. – Vol. 158. – P. 104800. doi:10.1016/j.resconrec.2020.104800
10. Screening for halogenated flame retardants in European consumer products, building materials and wastes / Š. Vojta [et al.] // Chemosphere. – 2017. – Vol. 168. – P. 457–466. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.11.032
11. Toxic recycling, or How unsorted waste may contaminate consumer products in the Czech Republic / J. Straková [et al.] // Organohalogen Compounds. – 2018. – Vol. 80. – P. 365–368.
12. Levels and distribution of polybrominated diphenyl ethers in humans and environmental compartments: a comprehensive review of the last five years of research / D. Klincić [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 27 (6). – P. 5744–5758. doi:10.1007/s11356-020-07598-7
13. Kukharchyk, T. Polybrominated diphenyl ethers in plastic waste of electrical and electronic equipment: a case study in Belarus / T. Kukharchyk, P. Přibylová, V. Chernyuk // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 27 (41). – P. 32116–32123. doi:10.1007/s11356-020-09670-8
14. Кухарчик, Т. И. Содержание загрязняющих веществ в отходах пластика электротехнических изделий в Беларуси / Т. И. Кухарчик, В. Д. Чернюк, В. П. Кулакович // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 2. – С. 224–233.
15. Draft guidance on preparing inventories of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants / Secretariat of the Basel, Rotterdam and Stockholm Conventions. – 2021. – 158 p.
16. Guidance on best available techniques and best environmental practices for the recycling and disposal of wastes containing polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Updated. UNEP, Stockholm convention. – 2021. – 107 p.
17. Zürich Statement on Future Actions on Per- and Polyfluoroalkyl Substances / A. Ritscher [et al.] // Environmental Health Perspectives. – 2018. – № 126 (8). – P. 1–5.
18. Poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS): sources, pathways and environmental data [Electronic resource] / Chief Scientist's Group report. – Bristol : Environment Agency, 2021. – Mode of access: www.gov.uk/government/publications. – Date of access: 15.08.2022.
19. Общие технические руководящие принципы экологически обоснованного регулирования отходов, состоящих из стойких органических загрязнителей, содержащих их или загрязненных ими [Electronic resource]. – 2019. – UNEP/CHW.14/7/Add.1/Rev.1. – Mode of access: <https://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW.14-7-Add.1-Rev.1.English.pdf> – Date of access: 10.07.2021.

## References

1. Kakareka S. V., Kukharchyk T. I. *Istochniki postupleniya stoykikh organicheskikh zagryazniteley v okruzhayushchuyu sredu: opyt vyyavleniya i izucheniya* [Sources of Persistent Organic Pollutants in the Environment: Experience in Identification and Study]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2012, no. 22, pp. 157–164. (in Russian)
2. Kukharchyk T. I., Kakareka S. V., Lapko T. L., Kozyrenko M. I. *Metodicheskiye rekomendatsii po vyyavleniyu i otsenke zapasov khimicheskikh veshchestv, dopolnitel'no v klyuchennykh v Stokgol'mskuyu konvensiyu o SOZ* [Guidelines for the identification and assessment of stocks of chemicals additionally included in the Stockholm Convention on POPs]. Minsk, 2013, 44 p. (in Russian)
3. Kukharchyk T. I., Kakareka S. V., Kozyrenko M. I. *Metodicheskiye rekomendatsii po vyyavleniyu i otsenke zapasov khimicheskikh veshchestv, v klyuchennykh v Stokgol'mskuyu konvensiyu o SOZ v 2011 g. i 2013 g. i nakhodyashchikhsya na rassmotrenii kak kandidaty v SOZ* [Guidelines for the identification and assessment of stocks of chemicals included in the Stockholm Convention on POPs in 2011 and 2013 and are under consideration as candidates for POPs]. Minsk, Institute of Nature Management of the NAS of Belarus Publ., 2015, 52 p.
4. Hansen E., Nillson N., Vium K. S. R. Hazardous substances in plastics. *Survey of chemical substances in consumer products*, 2014, no. 132. Denmark, The Danish Environmental Protection Agency, 2014, 182 p.
5. Lakhvich V. V., Varikov G. I. *Issledovaniye svoystv plenkoobrazuyushchikh penoobrazovateley dlya tusheniya goryuchikh zhidkostey* [Investigation of the properties of film-forming foam concentrates for extinguishing flammable liquids]. *Vestn. Komand.-inzhener. in-ta MChS Respubliki Belarus'* = Bulletin of the Command and Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, 2014, no. 1 (19), pp. 73–81. (in Russian)
6. Kukharchyk T. I., Kozyrenko M. I. *Ispol'zovaniye geksabromtsiklododekana v Belarusi, problemy vyyavleniya i predotvratshcheniya postupleniya v okruzhayushchuyu sredu* [Use of hexabromocyclododecane in Belarus, problems of detection and prevention of release into the environment]. *Viesci Nacyjanańaj akademii navuk Bielarusi. Sieryja chimičnykh navuk = News of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of chemical sciences*, 2016, no. 1, pp. 74–81. (in Russian)
7. Kukharchyk T. I., Kakareka S. V., Kozyrenko M. I., Chernyuk V. D., Krylovich A. V. *Spravochno-informatsionnyy byulleten' o khimicheskikh veshchestvakh v Belarusi, dopolnitel'no v klyuchennykh v Stokgol'mskuyu konvensiyu o SOZ v 2009–2019 godakh* [act sheet on chemicals in Belarus additionally included in the Stockholm Convention on POPs in 2009–2019]. Minsk, Institute of Nature Management of the NAS of Belarus, 2020, 52 p. (in Russian)
8. Gallen C., Banks A., Brandsma S., Baduel C., Thai P., Eaglesham G., Heffernan A., Leonards P., Bainton P., Mueller J. F. Towards development of a rapid and effective non-destructive testing strategy to identify brominated flame retardants in the plastics of consumer products. *Science of the Total Environment*, 2014, no. 491–492, pp. 255–265.

9. Wagner S., Schlummer M. Legacy additives in a circular economy of plastics: Current dilemma, policy analysis, and emerging countermeasures. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, no. 158, p. 104800.
10. Vojta Š., Bečanová J., Melymuk L., Komprdová K., Kohoutek J., Kukučka P., Klánová J. Screening for halogenated flame retardants in European consumer products, building materials and wastes. *Chemosphere*, 2017, no. 168, pp. 457–466.
11. Strakova J., Petrlik J., Pulkrabová J., Gramblička T. Toxic recycling, or How unsorted waste may contaminate consumer products in the Czech Republic. *Organohalogen Compounds*, 2018, no. 80, pp. 365–368.
12. Klinčić D., Dvorščák M., Jagić K., Mendaš G., Herceg Romanić S. Levels and distribution of polybrominated diphenyl ethers in humans and environmental compartments: a comprehensive review of the last five years of research. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, no. 27 (6), pp. 5744–5758.
13. Kukharchyk T., Přibylová P., Chernyuk V. Polybrominated diphenyl ethers in plastic waste of electrical and electronic equipment: a case study in Belarus. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, no. 27 (41), pp. 32116–32123.
14. Kukharchyk T. I., Chernyuk V. D., Kulakovych V. P. *Soderzhanije zagryaznyayushchikh veshchestv v otkhodakh plastika elektrotehnicheskikh izdelij v Belarusi* [The content of pollutants in plastic waste from electrical products in Belarus]. *Doklady NAN Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, no. 65 (2), pp. 224–223. (in Russian)
15. Draft guidance on preparing inventories of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. *Secretariat of the Basel, Rotterdam and Stockholm Conventions*, 2021, 158 p.
16. Guidance on best available techniques and best environmental practices for the recycling and disposal of wastes containing polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Updated. *UNEP, Stockholm convention*, 2021, 107 p.
17. Ritscher A. [et al.]. Zürich Statement on Future Actions on Per- and Polyfluoroalkyl Substances. *Environmental Health Perspectives*, 2018, no. 126 (8), pp. 1–5.
18. Environment Agency (2021) Poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS): sources, pathways and environmental data. Chief Scientist's Group report. Environment Agency, Bristol. Available at: [www.gov.uk/government/publications](http://www.gov.uk/government/publications) (accessed August 15, 2022).
19. UNEP/CHW.14/7/Add.1/Rev.1 (2019). *Obshchiye tekhnicheskiye rukovodystva po ekologicheski obosnovannogo regulirovaniya otkhodov, sostoyashchikh iz stoykikh organicheskikh zagryazniteley, soderzhashchikh ikh ili zagryaznennykh imi* [General technical guidelines for the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants]. Available at: <https://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW.14-7-Add.1-Rev.1.English.pdf> (accessed July 10, 2021). (in Russian)

### Информация об авторах

**Кухарчик Тамара Иосифовна** – доктор географических наук, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tkukharchyk@gmail.com

**Какарека Сергей Витальевич** – доктор технических наук, заведующий лабораторией трансграничного загрязнения, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: sk001@yandex.ru

**Козыренко Маргарита Ивановна** – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: margarita\_kozyrenko@tut.by

**Чернюк Владимир Дмитриевич** – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: chernyuk.vladimir.m@mail.ru

**Крылович Анастасия Вячеславовна** – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: krylovich\_nasty@mail.ru

### Information about the authors

**Tamara I. Kukharchyk** – D. Sc. (Geography), Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tkukharchyk@gmail.com

**Sergey V. Kakareka** – D. Sc. (Technical), Head of Laboratory of Transboundary Pollution, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10 , F. Skoriny Str., 220076 , Minsk, Belarus). E-mail: sk001@yandex.ru

**Marharyta I. Kazyrenka** – Ph. D. (Geography), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: margarita\_kozyrenko@tut.by

**Vladimir D. Chernyuk** – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: chernyuk.vladimir.m@mail.ru

**Anastasia V. Krylovich** – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: krylovich\_nasty@mail.ru

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ БАЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ВЫБРОСОВ ПЕНТАХЛОРБЕНЗОЛА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

А. В. Мальчикхина, С. В. Какарека

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Загрязнение окружающей среды стойкими органическими загрязнителями является острой проблемой современности. Статья посвящена разработке информационно-методической базы оценки непреднамеренных выбросов пентахлорбензола (PeХБ) дополнительного включенного в Приложение С Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях в 2009 г. На основе выполненного анализа научных исследований, посвященных выбросам хлорбензолов, разработаны удельные показатели выбросов для основных категорий источников, таких как: сжигание отходов, производство металлов и производство цемента. С использованием разработанных удельных показателей выполнена первая оценка объема непреднамеренного поступления PeХБ в окружающую среду Беларуси. Показано, что к источникам непреднамеренных выбросов PeХБ на территории Беларуси относятся сжигание отходов, производство цемента и металлов. Согласно выполненной оценке непреднамеренные выбросы PeХБ в 2020 г. составили 11,43 кг.

**Ключевые слова:** пентахлорбензол; непреднамеренные выбросы; источники; сжигание отходов; производство металлов; производство цемента; удельные показатели выбросов.

**Для цитирования.** Мальчикхина А. В., Какарека С. В. Информационно-методическая база для оценки непреднамеренных выбросов пентахлорбензола на территории Беларуси // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 145–156.

## THE INFORMATION AND METHODOLOGICAL BASE FOR THE ASSESSMENT OF UNINTENTIONAL EMISSIONS OF PENTACHLOROBENZENE IN BELARUS

A. V. Malchikhina, S. V. Kakareka

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** Environmental pollution by persistent organic pollutants is an acute problem our days. The article is devoted to the development of information and methodological base for the assessment of unintentional emissions of pentachlorobenzene (PeCB), which was included in Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants in 2009. Based on the analysis of scientific research on emissions of chlorobenzenes, emission factors for the main source categories were developed: waste incineration, metal production and cement production. Using the developed emission factors, the first assessment of the of unintentional PeCB emissions was made for Belarus. It is shown that the sources of unintentional emissions of PeCB in Belarus include waste incineration, cement and metal production. According to the assessment unintentional emissions of PeCB in 2020 were 11.43 kg.

**Keywords:** pentachlorobenzene; unintentional emissions; sources; waste incineration; metal production; cement production; emission factors.

**For citation.** Malchikhina A. V., Kakareka S. V. The information and methodological base for assessing unintentional emissions of pentachlorobenzene on the territory of Belarus. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 145–156.

**Введение.** Загрязнение окружающей среды стойкими органическими загрязнителями (СОЗ) относится к одной из актуальных экологических проблем современности из-за их высокой токсичности и стойкости в окружающей среде. Данный факт подтверждается подписанием в 2001 г. Стокгольмской конвенции о СОЗ, которая изначально регулировала 12 соединений. За прошедшие годы список соединений постоянно пересматривался и дополнялся, и в настоящее время он включает 31 соединение, в том числе и пентахлорбензол (PeХБ), который в 2009 г. на 4-й Конференции Сторон был включен в Приложение С данной Конвенции. Вещества, перечисленные в этом приложении, попадают под действие ст. 5 Стокгольмской конвенции «Меры по сокращению или ликвидации выбросов в результате непред-

намеренного производства». Одной из мер по регулированию выбросов является оценка существующих и прогнозируемых выбросов, включая разработку и ведение кадастров источников выбросов, а также оценку выбросов с учетом категорий источников, указанных в приложении.

ПеХБ относится к группе хлорбензолов, является промышленным химическим соединением, которое использовалось в качестве пестицида, антипара, в смеси с ПХБ в диэлектрических жидкостях в электротехническом оборудовании, а также в качестве промежуточного продукта при производстве пестицида пентахлорнитробензола (квинтозина/квиртоцена). ПеХБ обладает высокой способностью к биоаккумуляции, переносу на большие расстояния, а также оказывает токсическое воздействие на окружающую среду и человека [1]. В настоящее время ПеХБ обнаружен в окружающей среде глобально, в том числе в абиотической и биотической среде таких удаленных районов, как Арктика и Антарктика. Из-за его стойкости и токсичности производство и использование ПеХБ в промышленном масштабе прекращено, в то же время ПеХБ непреднамеренно образуется в некоторых промышленных производствах, а также в результате сжигания отходов.

Республика Беларусь является стороной Стокгольмской конвенции о СОЗ с 2004 г. В настоящее время ежегодно в рамках отчетности по этой Конвенции оцениваются непреднамеренные выбросы таких СОЗ, как ГХБ, ПХБ и ПХДД/Ф, в то время как оценки объемов поступления в окружающую среду ПеХБ на территории Беларусь отсутствуют. Это послужило предпосылкой для разработки информационно-методической базы оценки непреднамеренных выбросов ПеХБ на территории Беларусь.

**Методология оценки непреднамеренных выбросов ПеХБ.** Для разработки информационно-методической базы в качестве основы был выбран метод оценки выбросов с использованием удельных показателей выбросов, который используется при инвентаризации выбросов загрязняющих веществ на национальном уровне для предоставления отчетности в рамках международных конвенций: Конвенции о трансграничном загрязнении на большие расстояния и Стокгольмской конвенции о СОЗ.

Для определения источников непреднамеренных выбросов ПеХБ проанализированы инвентаризации выбросов данного СОЗ, выполненные другими странами. Анализ показал, что ПеХБ поступает в окружающую среду от таких процессов, как производство минеральной продукции, сжигание отходов, производство металлов, химическая промышленность, обработка сточных вод, обработка древесины. От данных процессов ПеХБ может поступать в атмосферный воздух, гидросферу, почву, отходы и продукцию (табл. 1).

**Таблица 1. Потенциальные источники непреднамеренных выбросов ПеХБ**

**Table 1. Potential sources of unintentional PeCB emissions**

Категория источника	Атмосферный воздух	Почва	Гидросфера	Продукция	Отходы
Производство строительных материалов	+	-	-	+	+
Сжигание отходов	+	-	-	-	+
Производство металлов	+	-	-	-	+
Химическая промышленность	+	-	+	-	-
Обработка древесины	+	-	+	+	-
Захоронение отходов	-	+	+	-	-
Обработка сточных вод	-	-	+	-	-
Электрооборудование	-	+	-	-	+

П р и м е ч а н и е. Информация о поступлении ПеХБ от данного источника в данную среду имеется «+» / отсутствует «-».

В Беларусь к потенциальным источникам непреднамеренных выбросов ПеХБ относятся: производство металлов, сжигание отходов, производство строительных материалов.

На первом этапе работ выполнен обзор научных исследований за последние десятилетия (1978–2020 гг.), связанных с изучением выбросов ПеХБ и проведенных в разных странах – Вьетнаме, Германии, Китае, Мексике, Нидерландах, США, Швеции, Японии, Финляндии, Корее (табл. 2). В настоящее время большинство исследований по выбросам СОЗ, включая выбросы хлорбензолов, на промышленных предприятиях проводятся в Китае, Тайване, Японии и Вьетнаме. В Европейских странах такие работы выполняли в начале 1990-х годов, а последние исследования связаны в первую очередь с оценкой эффективности систем очистки отходящих газов. Исследования выбросов ПеХБ при производстве цемента начали проводить в 2015 г., что связано с ростом сжигания объема отходов в цементных печах.

**Таблица 2. Сводная таблица характеристик публикаций, посвященных источникам выбросов ПеХБ****Table 2. Summary table of publications characteristics on sources of PeCB emissions**

Категория источника	Годы публикации	Страна
Сжигание отходов	1978–2020	Китай, Мексика, Нидерланды, США, Швеция, Япония
Производство металлов	1996–2020	Вьетнам, Китай, Финляндия, Швеция
Производство цемента	2015–2020	Китай, Вьетнам
Прочие производства (коксование, магний, термическая утилизация проводов, производство хлорамила, агломерация железной руды)	2009–2013	Китай

Несмотря на достаточно большое количество исследований, информация по удельным показателям выбросов ПеХБ ограничена и разрозненна. Работы, посвященные непреднамеренным выбросам ПеХБ, условно можно разделить на такие группы, как: 1) оценка влияния различных факторов на выбросы СОЗ; 2) определение содержания СОЗ в различных средах (отходящие газы, летучая зола и др.); 3) определение возможности измерения диоксинов/фуранов или других СОЗ с помощью измерения ПеХБ; 4) изучение методов определения и пробоотбора СОЗ; 5) оценка выбросов и ведение кадастров; 6) возможности снижения выбросов ПеХБ.

Удельные показатели непреднамеренных выбросов ПеХБ представлены в работах, посвященных определению содержания СОЗ в различных средах, а также оценке и ведению кадастров выбросов. В работах, описывающих оценку влияния различных факторов на выбросы СОЗ, обычно содержится информация о концентрации ПеХБ в отходящих газах, летучей золе или остаточной золе. В некоторых работах предоставлена достаточная информация для пересчета концентрации ПеХБ в удельные показатели выбросов.

На основе обзора научных исследований непреднамеренных выбросов ПехБ создана база данных эмиссионных факторов, в которой содержится максимально детальная информация об источниках, для которых эти удельные показатели выбросов были получены. Например, для сжигания отходов в базу данных включены: состав отходов; температура сжигания; система очистки отходящих газов; страна, в которой выполнялись исследования; описание технологии сжигания; мощность установки; температура отходящих газов; концентрация ПеХБ; метод отбора проб и проведения измерений. На втором этапе работы собрана информация о возможных источниках непреднамеренных выбросов на территории Беларуси, включающая технологию, применяемые при производстве промышленной продукции и сжигании отходов, методы очистки отходящих газов, используемое сырье и топливо. Эта информация впоследствии была учтена при разработке удельных показателей выбросов, а также для оценки объема поступления ПехБ в окружающую среду на территории Беларуси.

**Результаты. Разработка удельных показателей выбросов от процессов сжигания отходов.** В работах по инвентаризации выбросов ПехБ, выполненных другими авторами, для оценки выбросов ПехБ от сжигания отходов использованы усредненные эмиссионные факторы без учета состава отходов и методов их сжигания, например, в работе [2] для оценки выбросов на глобальном уровне использован удельный показатель выбросов 28 мг/т отходов.

В работе [3] для дополнения Руководства ЮНЕП (Программа ООН по окружающей среде) предложено всего два удельных показателя выбросов: для сжигания бытовых отходов (сжигание в современных установках с улучшенной системой ПГО, удовлетворяющей стандартам по выбросам диоксинов/фуранов) и опасных отходов (сжигание с хорошей эффективностью и хорошим ПГО) – 0,2 и 10,0 мг/т соответственно.

Для оценки выбросов ПехБ также иногда используют коэффициенты перехода от выбросов диоксинов/фуранов или ГХБ к выбросам ПехБ. Примеры таких коэффициентов приведены в табл. 3.

Рассмотренные выше подходы к получению оценки выбросов ПехБ от процессов сжигания отходов не позволяют учесть состав сжигаемых отходов, а также технологию сжигания и системы ПГО, что может привести к неточности получаемых оценок выбросов. В настоящей работе предлагается использовать более детальный подход, учитывающий тип отходов и технологию их сжигания.

В анализируемых литературных источниках описаны исследования сжигания разных по составу отходов в различных типах установок. Каждый тип установок характеризуется своими параметрами: температурой горения, концентрацией кислорода, временем нахождения отходов в камере горения и др. Такое разнообразие факторов приводит к тому, что полученные оценки удельных показателей выбросов варьируют в широких пределах. Например, в работе [4] приведенный обзор удельных показателей выбросов показал, что эмиссионные факторы могут варьировать в пределах от 0,1 до 4700 мкг/кг.

**Таблица 3. Средние коэффициенты пересчета между выбросами ПeХБ, ГХБ и диоксинов/фуранов, единиц массы [4]**

**Table 3. Average conversion coefficients between emissions of PCBs, HCB and dioxins/furans, units of mass [4]**

Категория	ПeХБ/диоксины	ПeХБ/ГХБ
Сжигание бытовых отходов в необорудованных установках	10	2
Установки по сжиганию промышленных отходов	5	5
Установки по сжиганию опасных отходов	50	3

В ходе анализа литературных источников собрана база данных удельных показателей выбросов ПeХБ от процессов сжигания отходов, содержащая 86 удельных показателей выбросов ПeХБ. Более 50 % показателей связано с выбросами в атмосферный воздух; 17 % – с поступлением в остаточную золу и 18 % – в летучую золу (табл. 4).

**Таблица 4. Состав базы данных по удельным показателям выбросов ПeХБ для категории «сжигание отходов» (по состоянию на 30.09.2022)**

**Table 4. Composition of the database on specific indicators of PeCB emissions for the "waste incineration" category (as of 30.09.2022)**

Категория отходов	Количество записей в базе данных		
	Атмосферный воздух	Остаточная зола	Летучая зола
Бытовые отходы	24	10	12
Медицинские отходы	6	2	2
Опасные отходы	11	–	–
Промышленные отходы	10	5	4

Следует отметить, что выделение таких категорий отходов, как «бытовые», «опасные» и «промышленные», достаточно условно, ведь некоторые виды отходов могут быть отнесены к любой из вышеперечисленных категорий. В дальнейшей работе классификация пересмотрена с учетом описания состава сжигаемых отходов, а также классификатора отходов, используемого в Беларуси.

Мета-анализ собранных удельных показателей выбросов ПeХБ показал, что на выбросы ПeХБ от процессов сжигания отходов оказывают влияние следующие факторы: состав отходов, технология сжигания отходов и методы очистки отходящих газов. Максимальный разброс значений удельных показателей выбросов наблюдается для опасных отходов (табл. 5). Минимальное значение получено в исследовании [5] для предприятия по сжиганию опасных отходов; максимальное – в исследовании, в котором отходы ПВХ были сожжены в муфельной печи [6].

**Таблица 5. Мета-анализ литературных данных по удельным показателям выбросов ПeХБ в атмосферный воздух для процессов сжигания отходов**

**Table 5. Meta-analysis of literature data on PeCB emission factors into atmosphere for waste incineration processes**

Вид отходов	Диапазон значений удельных показателей выбросов, мг/т	Средний удельный показатель выбросов, мг/т	Медиана, мг/т	Источник(и)
Биомасса	1,61–196,00	26,97	11,97	[7–9]
Отходы, загрязненные органическими веществами	0,15–1,19	0,46	0,32	[10]
Опасные отходы	0,09–26 300,00	2938,37	14,00	[5, 6, 11–13]
Медицинские отходы	12,81–67,13	34,94	25,45	[14]
Бытовые отходы	<0,001–340,2	62,86	0,52	[15–21]

Удельные показатели выбросов ПeХБ от сжигания бытовых отходов также характеризуются большим диапазоном значений, что в первую очередь объясняется разнородным составом сжигаемых отходов, а также различными условиями их сжигания. Минимальные удельные показатели получены для сжигания смеси древесины, бумаги и пластика в лабораторной установке, максимальный – для предприятия по сжиганию бытовых отходов в псевдоожженном слое с использованием отработанного песка.

Основываясь на ограниченных и разрозненных данных, представленных в научной литературе, разработаны удельные показатели непреднамеренных выбросов ПеХБ от процессов сжигания отходов, дифференцированные по группам отходов, а также по технологиям обезвреживания отходов и системам очистки отходящих газов. Выделены следующие классы технологий:

- класс I: сжигание отходов партиями, мощность установок <500 кг/ч, без очистки отходящих газов или газоочистная установка (ГОУ) со степенью улавливания твердых частиц (ТЧ) <90 %;
- класс II: установки с непрерывной подачей отходов, ГОУ со степенью улавливания ТЧ 90–95 %;
- класс III: установки с непрерывной подачей отходов, ГОУ со степенью улавливания ТЧ > 95 %;
- класс IV: автоматическая станция по сжиганию отходов, ГОУ со степенью улавливания ТЧ ≥ 99 % с использованием специальных мер по снижению выбросов диоксинов/фуранов.

Собранные в базу данных удельные показатели выбросов агрегированы по группам отходов. Для каждого вида отходов удельные показатели выбросов разбиты по классам установок на основе доступных данных по методам сжигания и ГОУ. В результате анализа собранных данных получены удельные показатели выбросов, представленные в табл. 6.

**Таблица 6. Сводная таблица удельных показателей выбросов ПеХБ в атмосферный воздух для процессов сжигания отходов, мг/т**

**Table 6. Summary table of PeCB emission factors into atmosphere for waste incineration processes, mg/t**

Группа отходов	Класс I	Класс II	Класс III	Класс IV
Биомасса	13,44	2,24	0,45	–
Отходы, загрязненные химическими веществами	46,10	4,61	0,46	–
Опасные отходы	2240,00	224,00	6,40	0,48
Медицинские отходы	465,87	34,94	6,11	0,01
Бытовые отходы	192,53	23,22	3,66	0,84

В настоящее время исследований, направленных на изучение загрязнения остаточной золы и летучей золы стойкими органическими загрязнителями, в том числе и ПеХБ, проведено мало (выявлено семь работ). Следует отметить, что вариабельность полученных в ходе различных исследований значений не такая высокая, как для атмосферного воздуха (табл. 7 и 8). Максимальным разбросом значений содержания ПеХБ в золе характеризуются процессы сжигания бытовых отходов, что может быть объяснено широким перечнем отходов, попадающих под эту категорию. Для медицинских отходов и биомассы найдено только по два значения для остаточной золы и летучей золы.

**Таблица 7. Мета-анализ литературных данных по содержанию ПеХБ в остаточной золе и удельным показателям выбросов**

**Table 7. Meta-analysis of literature data on the PeCB content and emission factors for bottom ash**

Вид отходов	Параметр	Диапазон значений	Среднее значение	Медиана	Источник(и)
Биомасса	Концентрация, нг/г	4,65	–	–	[22]
	Удельный показатель выбросов, мкг/т	32,00–61,00	46,00	–	[22]
Отходы, загрязненные химическими веществами	Концентрация, нг/г	1,13–11,69	5,66	4,90	[22, 23]
	Удельный показатель выбросов, мкг/т	113,00–760,00	451,00	465,50	[22, 23]
Опасные отходы	Концентрация, нг/г	8,4–27,3	17,07	15,50	[22, 23]
	Удельный показатель выбросов, мкг/т	1008,00–2190,00	1686,00	1860,00	[22, 23]
Медицинские отходы	Концентрация, нг/г	1,7–7,16	4,43	–	[22, 24]
	Удельный показатель выбросов, мкг/т	0,716	–	–	[22, 24]
Бытовые отходы	Концентрация, нг/г	0,05–39,00	10,12	2,00	[23–25]
	Удельный показатель выбросов, мкг/т	5,1–77,00	42,70	46,00	[23–25]

Исходя из достаточно ограниченной информации для летучей золы и остаточной золы, можно предложить удельные показатели выбросов, дифференцированные только по группе отходов (табл. 9). Минимальные значения предлагаются для сжигания биомассы, максимальные – для опасных и медицинских отходов.

**Таблица 8. Мета-анализ литературных данных по содержанию ПеХБ в летучей золе и удельным показателям выбросов**

**Table 8. Meta-analysis of literature data on the PeCB content and emission factors for fly ash**

Вид отходов	Параметр	Диапазон значений	Среднее значение	Медиана	Источники
Биомасса	Концентрация, нг/г	1,22–1,85	1,55	1,58	[23, 26]
	Удельный показатель выбросов, мкг/т	9,25	–	–	[23, 26]
Отходы, загрязненные химическими веществами	Концентрация, нг/г	5,55–25,76	8,58	9,80	[19, 22]
	Удельный показатель выбросов, мкг/т	277,00–490,00	355,67	300,00	[19, 22]
Опасные отходы	Концентрация, нг/г	27,00–37,20	33,63	36,70	[22, 25]
	Удельный показатель выбросов, мкг/т	744,00–1835,00	1039,67	1350,00	[22, 25]
Медицинские отходы	Концентрация, нг/г	0,70–10,3	5,50	–	[24, 25]
	Удельный показатель выбросов, мкг/т	206,00	–	–	[24, 25]
Бытовые отходы	Концентрация, нг/г	1,34–150,00	33,65	22,10	[22, 24, 26]
	Удельный показатель выбросов, мкг/т	6,70	–	–	[22, 24, 26]

**Таблица 9. Сводная таблица удельных показателей выбросов ПеХБ в летучую золу и остаточную золу, мкг/т**

**Table 9. Summary table of PeCB emission factors for fly ash and bottom ash, µg/t**

Группа отходов	Летучая зола	Остаточная зола
Биомасса	9,25	46,00
Отходы, загрязненные химическими веществами	263,11	347,18
Опасные отходы	713,90	587,62
Медицинские отходы	206,00	716,00
Бытовые отходы	107,87	174,80

Удельные показатели выбросов от процессов производства металлов. Согласно выполненному анализу, источниками непреднамеренных выбросов ПеХБ в металлургической промышленности являются следующие процессы: производство меди [27, 28], алюминия [29, 30], стали и цинка [6, 23, 24]; переработка металлолома [27].

В работе по инвентаризации выбросов на глобальном уровне для оценки объема поступления ПеХБ от процессов производства металлов рассматривается только производство алюминия с использованием гексахлорэтана (ГХЭ) для дегазации с удельным показателем выбросов 310 мкг/г ГХЭ [2].

Для дополнения руководства ЮНЕП в работе [3] предложен удельный показатель выбросов для производства стали с использованием загрязненного сырья, равный 1200 мкг/т, для производства первичной меди – 150 и вторичной меди – 3000 мкг/т. Также предложено по одному удельному показателю выбросов для производства цинка и магния.

По данным научных исследований, ПеХБ от вышеуказанных производств может поступать в атмосферный воздух, остаточную золу и летучую золу. Следует отметить, что в отличие от процессов сжигания отходов металлургическое производство изучено в меньшей степени. Всего выявлено 22 удельных показателя выбросов, из них для атмосферного воздуха – 9, для остаточной золы – 7, для летучей золы – 6.

Для производства стали имеются данные о поступлении ПеХБ в летучую золу и остаточную золу. Концентрация ПеХБ в летучей золе варьирует в пределах от 1,13 до 3,62 нг/г [22–24], в остаточной золе – 1,6–13,7 нг/г [22, 24]. Только в одном исследовании приведены удельные показатели выбросов ПеХБ, в то время как в остальных – концентрация ПеХБ в выбросах. Удельные показатели выбросов, предлагаемые для оценки, представлены в табл. 10.

Для производства вторичного алюминия основным фактором, влияющим на выбросы ПеХБ, является использование ГХЭ для дегазации [29, 30]. Удельный показатель выбросов при этом составляет 310 мкг/г ГХЭ [30].

Основным фактором, влияющим на поступление ПеХБ в атмосферный воздух от процессов производства меди, является используемое сырье. По этой причине предлагается дифференциация удельных показателей выбросов на две подкатегории: для употребления чистого сырья и для использования смешанного лома (табл. 10).

**Таблица 10. Сводная таблица удельных показателей выбросов ПеХБ от производственных процессов, мкг/т****Table 10. Summary table PeCB emission factors from production processes, mkg/t**

Производимая продукция	Технология	Летучая зола	Остаточная зола	Атмосфера
Сталь	Электродуговые печи мощностью до 1 т/ч	–	1507	–
	Электродуговые печи мощностью от 1 т/ч	61	454	–
Алюминий	Дегазация алюминия с использованием ГХЭ	–	–	310*
Медь	Выплавка вторичной меди с использованием смешанного лома	–	–	4537
	Выплавка вторичной меди с использованием чистого сырья	–	–	1375
Цемент	Сухой метод производства	136	233	1109,12

\* Единица измерения удельного показателя выбросов – мг/кг ГХЭ.

**Удельные показатели выбросов от производств цемента.** Производство цемента не является ключевым источником непреднамеренных выбросов ПеХБ, в то же время цементные печи часто используют для утилизации опасных отходов, что явилось предпосылкой проведения исследований на цементных производствах. Так, для оценки рисков, связанных со сжиганием опасных отходов в цементных печах во Вьетнаме и Китае, выполнен ряд исследований, в ходе которых оценены выбросы ПеХБ. В настоящее время есть возможность определить удельные показатели выбросов для процесса производства цемента сухим способом. Только в одном исследовании приведены данные по оценке выбросов ПеХБ в атмосферный воздух, согласно которому концентрация ПеХБ в отходящих газах варьирует в пределах 18–335 нг/м<sup>3</sup> [31]. Данная концентрация была пересчитана на удельный показатель выбросов, который составил 1109,12 мкг/т. Полученный удельный показатель близок по значению тому, который предложен в работе [3].

Концентрация ПеХБ в летучей золе цементного производства составляет 0,3–11 нг/г, в остаточной золе – 1,7–1,94 нг/г. Сведения об удельных показателях выбросов даны только в работе [6]. Эти удельные показатели выбросов предлагается использовать для оценки объема поступления ПеХБ в остаточную золу и летучую золу на территории Беларуси (см. табл. 10).

**Обсуждение.** Для верификации полученных удельных показателей выбросов выполнена предварительная оценка выбросов ПеХБ на территории Беларуси и сравнение полученных данных с инвентаризациями других стран. Согласно выполненной оценке в 2020 г. в окружающую среду Беларуси поступило 11,4 кг ПеХБ, из них в атмосферный воздух – 72,8 %, в остаточную золу – 20,1, в летучую золу – 7,1 %.

Основным источником поступления ПеХБ в окружающую среду является производство цемента, доля которого составляет 61,2 %, и процессы сжигания отходов (27,2 %). Выбросы от производства электростали составляют 11,5 % от валового объема поступления ПеХБ в окружающую среду. Следует отметить, что 25 % объема ПеХБ при производстве цемента попадает в остаточную золу, которая в основной своей массе поступает обратно в технологический цикл.

Инвентаризацию непреднамеренных выбросов ПеХБ в других странах выполняют в рамках требований международных документов: Протокола о регистрах выбросов и переноса загрязнителей Орхусской Конвенции (РВПЗ) и Стокгольмской Конвенции о СОЗ; в соответствии с требованиями национального законодательства (США), а также в ходе научных исследований. Объем непреднамеренного образования ПеХБ оценивают, основываясь на удельных показателях выбросов, описанных в литературных источниках, или на экспериментальных данных, полученных в ходе исследований [32].

Для верификации полученных данных на национальном уровне обосновано использовать данные стран, представленные в рамках отчетности по Стокгольмской конвенции о СОЗ [33]. В настоящий момент данные за период 2001–2016 гг. предоставили семь стран. Из них только Великобритания, Япония, Испания и Ирландия предоставили данные для нескольких источников и сред, в то время как Бельгия, Нидерланды и Португалия предъявили данные о выбросах от категории «прочее». Представленные в рамках отчетности по Стокгольмской конвенции валовые национальные непреднамеренные выбросы ПеХБ варьируют в пределах от 0,7 до 329 кг/год в зависимости от года и страны. Согласно национальным отчетам, выбросы ПеХБ в основном обусловлены такими источниками, как сжигание отходов, электроэнергетика, производство металлов, захоронение отходов и производство строительных материалов.

Согласно национальным отчетам, к основным источникам непреднамеренных выбросов относится сжигание отходов. Выбросы от данной категории составляют: в Великобритании – 0,32–1,08 кг, в Ирландии – 0,3–0,52, в Японии – 14,7–161 [32], в Канаде – 26,13 кг [34]. В Великобритании отходы в последнее время сжигают в теплоэлектростанциях, что привело к увеличению выбросов от данной категории с 10,94 кг в 2001 г. до 27,27 кг в 2016 г. В Ирландии выбросы от электроэнергетики достигли 0,7–1,5 кг/год [32]. Согласно выполненной оценке, выбросы от сжигания отходов в Беларуси составили 3,11 кг. В пересчете на численность населения выбросы ПеХБ в атмосферный воздух от сжигания отходов в Великобритании составили в среднем 0,18 кг/млн чел., в Ирландии – 0,27, в Японии – 0,98 кг/млн чел. Оценки, полученные нами для Беларуси, находятся в диапазоне значений, полученных для других стран, и составляют 0,32 кг/млн чел.

Выбросы ПеХБ в атмосферный воздух от процессов производства металлов в Великобритании варьируют в пределах от 7,23 до 12,47 кг/год, в Японии – от 32,2 до 75,0 кг/год [32]. Данные выбросы обусловлены всей металлургической отраслью, включая агломерацию железной руды, производство алюминия, цинка и др. В настоящей работе для Беларуси оценены выбросы только от процессов производства электростали, которые составили 1,32 кг. ПеХБ от данного источника поступает в летучую золу и остаточную золу.

В Японии производство продукции из минерального сырья является одним из основных источников выбросов ПеХБ в атмосферу (26–67 % от валовых выбросов), в массовом выражении выбросы варьируют в пределах 61–95 кг/год [2]. В Беларуси выбросы составили 7 кг/год. Так как производство цемента в Японии в среднем в 10 раз больше, чем в Беларуси [35], полученная оценка выбросов сопоставима с оценками для Японии.

В Европе в рамках Орхусской конвенции, а также в США в рамках отчетности по программе Инвентаризации токсичных выбросов (TRI) данные о выбросах ПеХБ предоставляют только предприятия, удовлетворяющие ряду критериев. В связи с этим данные РВПЗ и TRI можно использовать для верификации выбросов от отдельных категорий источников, а также для уточнения и дополнения списка потенциальных источников выбросов.

В рамках отчетности по Орхусской конвенции данные о выбросах предоставляют предприятия, выбросы которых превышают пороговое значение (1 кг/год) или перенос ПеХБ которых за пределы предприятия превышает 5 кг/год [33]. Предприятия оценивают выбросы с использованием измерений или расчета. Согласно данным РВПЗ, ПеХБ в атмосферный воздух в 2008–2011 гг. поступал от предприятий по производству чугуна и стали; выбросы по предприятиям составляли 36,6–981 кг/год. В 2012 и 2020 г. данные о выбросах ПеХБ в атмосферу предоставили предприятия по переработке отходов (очистка сточных вод, переработка и захоронение опасных отходов) – 1,50–1,58 кг/год. Все данные, за исключением одного значения, для предприятия по переработке отходов были получены с помощью измерений.

Согласно данным, предоставленным в Е-РВПЗ, ПеХБ может поступать в окружающую среду со сточными водами от предприятий таких категорий источников, как: нефтепереработка (до 121 кг/год от одного предприятия), производство пластика (до 44), очистка сточных вод (до 59,4), производство азотных соединений (до 604 кг/год). Оценить объем непреднамеренного поступления ПеХБ в гидросферу в настоящее время не представляется возможным, так как научные исследования по данной тематике не проводились.

В США о выбросах ПеХБ предприятия отчитываются в рамках программы TRI, которая направлена на исследование опасных загрязняющих веществ и снижение их воздействия на окружающую среду и человека. Согласно данной программе, должны отчитываться промышленные предприятия, на которых работает более 10 сотрудников, а также в деятельности которых присутствуют вещества из списка и объем их обращения превышает определенный порог; для ПеХБ данных порог составляет 10 фунтов (4,5 кг). Согласно данным, размещенным на сайте TRI в 2020 г., объем поступления ПеХБ в окружающую среду от отчитавшихся предприятий составил 697,09 кг. Основной объем (311,03 кг) поступил в отходы и был захоронен на полигоне; практически такое же количество ПеХБ (290,4 кг) попало в гидросферу [36]. В атмосферный воздух поступило 95,68 кг ПеХБ, из них 79 % – от неорганизованных источников. Основным источником непреднамеренных выбросов ПеХБ в атмосферный воздух является химическая промышленность. Неорганизованные выбросы от предприятий химической промышленности могут достигать 54 кг/год, организованные – 6,5 кг/год; выбросы от предприятий по переработке опасных отходов составляют 0,04–2,79 кг/год, от предприятий по обработке древесины – 0,45–1,8 кг/год. Основным источником непреднамеренного поступления ПеХБ в гидросферу являются предприятия по деревообработке (выбросы – до 188,1 кг/год), и предприятия нефтепереработки (выбросы – до 42,8 кг). В настоящее время на территории Беларуси нет источников, выбросы от которых могут быть сравнимы с предприятиями, предоставляющими отчетность в рамках программы TRI.

**Заключение.** Разработана информационно-методическая база оценки непреднамеренных выбросов ПеХБ от основных категорий источников для территории Беларусь: сжигание отходов, производство металлов и производство цемента. Разработаны удельные показатели выбросов ПеХБ в атмосферный воздух для процессов сжигания отходов, дифференцированные по группам отходов, технологиям сжигания и системам ПГО, производства алюминия, меди и цемента. Разработаны удельные показатели выбросов ПеХБ в летучую золу и остаточную золу для цементного производства, производства стали, а также от процессов сжигания отходов по типам отходов. Получена предварительная оценка непреднамеренных выбросов ПеХБ на территории Беларусь в 2020 г., согласно которой объем поступления ПеХБ в окружающую среду составил 11,4 кг; установлено, что основным источником непреднамеренных выбросов ПеХБ являются процессы производства цемента. Максимальный объем ПеХБ поступает в атмосферный воздух. Полученные оценки выбросов для процессов сжигания отходов в пересчете на численность согласуются с данными Великобритании, Ирландии и Японии. Полученные оценки выбросов ПеХБ от производства цемента согласуются с оценками, полученными для Японии. Верификация оценок выбросов от производства стали в настоящее время затруднена.

#### Список использованных источников

1. Доклад Комитета по рассмотрению стойких органических загрязнителей о работе третьего совещания. Добавление. Характеристика рисков, связанных с применением пентахлорбензола. UNEP/POP/PORC.3/20/Add.7 – 2007. – 24 p.
2. Bailey, R. E. Sources and Prevalence of Pentachlorobenzene in the Environment / R. E. Bailey, D. van Wijk, P. C. Thomas // Chemosphere. – 2009. – Vol. 75 (5). – P. 555–564. doi:/10.1016/j.chemosphere.2009.01.038
3. Emission Factors of Unintentional HCB and PeCBz and Their Correlation with PCDD/PCDF / W. Gong [et al.] // Environmental Pollution. – 2017. – Vol. 230. – P. 516–522. doi:/10.1016/j.envpol.2017.05.082
4. Hogendoorn, E. A. Inventory Emission Factors for Pentachlorobenzene / E. A. Hogendoorn, B. Y. de Bruin, M. P. M. Janssen. – 2009. – 22 p.
5. PCDD/F and PCBz Emissions during Start-up and Normal Operation of a Hazardous Waste Incinerator in China / X. Lin [et al.] // Aerosol and Air Quality Research. – 2014. – Vol. 14. – P. 1142–1151. doi:/10.4209/aaqr.2013.03.0068
6. Emission Characteristics of PCDD/Fs, PCBs, Chlorobenzenes, Chlorophenols, and PAHs from Polyvinylchloride Combustion at Various Temperatures / K.-S Kim, K.-H. Hong, Y.-H. Ko, M.-G. Kim // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2004. – Vol. 54 (5). – P. 555–562. doi:/10.1080/10473289.2004.10470925
7. Wikstrom, E. Influence of Variation in Combustion Conditions on the Primary Formation of Chlorinated Organic Micropollutants during Municipal Solid Waste Combustion / E. Wikstrom, M. Tysklind, S. Marklund // Environmental Science & Technology. – 1999. – Vol. 33. – P. 4263–4269. doi:/10.1021/es990568b
8. Chlorinated Dioxins & related compounds. Impact on the Environment / ed. O. Hutzinger [et al.] // Science. – 1982. – 658 p.
9. Influence of Combustion Parameters on the Formation of Polychlorinated Dibenzo-pdioxins, Dibenzofurans, Benzenes, and Biphenyls and Polyaromatic Hydrocarbons in a Pilot Incinerator / I. Fangmark [et al.] // Environmental Science & Technology. – 1993. – Vol. 27. – P. 1602–1610. doi:/10.1021/es00045a016
10. Emission of Nonchlorinated and Chlorinated Aromatics in the Flue Gas of Incineration Plants during and after Transient Disturbances of Combustion Conditions: Delayed Emission Effects / R. Zimmermann [et al.] // Environmental Science & Technology. – 2001. – Vol. 35. – P. 1019–1030. doi:/10.1021/es000143
11. Ahling, B. Formation of chlorinated hydrocarbons during combustion of poly (vinyl chloride) / B. Ahling, A. Bjorseth, G. Lunde // Chemosphere. – 1978. – Vol. 10. – P. 799–806. doi:/10.1016/0045-6535(78)90063-2
12. Estimating concentrations of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the stack gas of a hazardous waste incinerator from concentrations of chlorinated benzenes and biphenyls / A. Kaune [et al.] // Chemosphere. – 1994. – Vol. 29. – P. 2083–2096. doi:/10.1016/0045-6535(94)90376-X
13. Oberg, T. Chlorinated aromatics from the combustion of hazardous waste / T. Oberg, J.-P. Aittola, J. G. T. Bergström // Chemosphere. – 1985. – Vol. 14. – P. 215–221. doi:10.1016/0045-6535(85)90100-6
14. Effect of temperature and oxygen on the formation of chlorobenzene as the indicator of PCDD/Fs / M. Yan [et al.] // Journal of Environmental Sciences. – 2010. – Vol. 22 (10). – P. 1637–1642. doi:/10.1016/S1001-0742(09)60300-4
15. Chlorodibenzodioxins, chlorodibenzofurans and related compounds in the effluents from combustion processes / T. O. Tiernan [et al.] // Chemosphere. – 1983. – Vol. 12. – P. 595–606. doi:/10.1016/0045-6535(83)90217-5
16. Kato, M. Convenient substitute indices to toxic equivalent quantity for controlling and monitoring dioxins in stack gas from waste incineration facilities / M. Kato, K. Urano // Waste Manage. – 2001. – Vol. 21. – P. 55–62. doi:10.1016/s0956-053x(00)00048-9
17. Akimoto, Y. Comparative study on formations of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans and related compounds in a fluidized bed solid waste incinerator using long term used sand and fresh sand / Y. Akimoto, S. Nito, Y. Inouye // Chemosphere. – 1997. – Vol. 34. – P. 791–799. doi:/10.1016/S0045-6535(97)00007-6
18. Jay, K. Identification and quantification of volatile organic components in emissions of waste incineration plants / K. Jay, L. Stieglitz // Chemosphere. – 1995. – Vol. 30. – P. 1249–1260. doi:/10.1016/0045-6535(95)00021-Y

19. Emission of unintentionally produced persistent organic pollutants (UPOPs) from municipal waste incinerators in China / Y. Li [et al.] // Chemosphere. – 2016. – Vol. 158. – P.17–23. doi:/10.1016/j.chemosphere.2016.05.037
20. Investigation of PCDD/Fs Indicators in Flue Gas from Waste Incinerators / Y. Mi [et al.] // Journal of Combustion Science and Technology. – 2010. – Vol. 16 (3). – P. 257–261.
21. Emissions of unintentional persistent organic pollutants from open burning of municipal solid waste from developing countries / T. Zhang [et al.] // Chemosphere. – 2011. – Vol. 84. – P. 994–100. doi:10.1016/j.chemosphere.2011.04.070
22. Nguyen, T. H. Emission characterization of PeCB, HCB and their correlation in fly and bottom ashes from various thermal industrial processes in Northern Vietnam / T. H. Nguyen, T. P. M. Nguyen // Human and Ecological Risk Assessment : An International Journal. – 2020. – Vol. 2. – P. 378–391. doi:/10.1080/10807039.2020.1718486
23. Levels, profiles, and emission characteristic of chlorobenzenes in ash samples from some industrial thermal facilities in northern Vietnam / H. T. Nguyen [et al.] // Environmental Science and Research. – 2018. – Vol. 26 (1). – P. 188–198. doi:10.1007/s11356-018-3591-9
24. Hue, N. T. Polychlorobenzenes and polychlorinated biphenyls in ash and soil from several industrial areas in North Vietnam: residue concentrations, profiles and risk assessment / N. T. Hue, N. T. T. Thuy, N. H. Tung // Environmental Geochemistry Health. – 2015. – Vol. 38 (2). – P. 399–411. doi:10.1007/s10653-015-9726-8
25. Concentrations, profiles, emission inventory, and risk assessment of chlorinated benzenes in bottom ash and fly ash of municipal and medical waste incinerators in northern Vietnam / T. T. T. Nguyen [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 28 (11). – P. 13340–13351. doi:10.1007/s11356-020-11385-9
26. Determination of hexachlorobutadiene, pentachlorobenzene, and hexachlorobenzene in waste incineration fly ash using ultrasonic extraction followed by column cleanup and GC-MS analysis / H. Zhang [et al.] // Analytical and bioanalytical chemistry. – 2018. – Vol. 410. – P. 1893–1902. doi:/10.1007/s00216-018-0849-5
27. Characterization and quantification of unintentional POP emissions from primary and secondary copper metallurgical processes in China / Z. Nie [et al.] // Atmospheric Environment. – 2012. – Vol. 57. – P. 109–115. doi:/10.1016/j.atmosenv.2012.04.048
28. Concentrations and profiles of persistent organic pollutants unintentionally produced by secondary nonferrous metal smelters: Updated emission factors and diagnostic ratios for identifying sources / Y. Yang [et al.] // Chemosphere. – 2020. – 8 p. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126958
29. Formation of chloroaromatics at a metal reclamation plant and efficiency of stack filter in their removal from emission / J. P. Aittola [et al.] // Chemosphere. – 1996. – Vol. 32 (1). – P. 99–108. doi:/10.1016/0045-6535(95)00236-7
30. Westberg, H. B. Emissions of some organochlorine compounds in experimental aluminum degassing with hexachloroethane / H. B. Westberg, A. I. Seldén, T. Bellander // Applied Occupational and Environmental Hygiene. – 1997. – Vol. 12 (3). – P. 178–183. doi:/10.1080/1047322X.1997.10389485
31. Formation, reduction and emission behaviors of CBzs and PCDD/Fs from cement plants / Y. Q. Li [et al.] // Aerosol and Air Quality Research. – 2016. – Vol. 16 (8). – P. 1942–1953. doi:/10.4209/aaqr.2016.01.0045
32. Reports Dashboard Stockholm Convention [Electronic resource]. – Available at: [http://ers.pops.int/eRSodataReports2/ReportSC\\_DashBoard.html](http://ers.pops.int/eRSodataReports2/ReportSC_DashBoard.html) (accessed 15 March 2022).
33. Regulation (EC) No 166/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the establishment of a European Pollutant Release and Transfer Register and amending Council Directive 91 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32006R0166>. – Date of access: 28.10.2022.
34. Pentachlorobenzene (QCB) and TetrachlorobenzeneS (TECBS). Proposed Risk Management Strategy // Chemicals Control Branch Environmental Protection Service. – 2005. – 21 p.
35. Cement statistics and Information [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cement-statistics-and-information>. – Date of access: 28.10.2022.
36. TRI data and tools [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/tri-data-and-tools>. – Date of access: 10.10.2022.

## References

1. Doklad Komiteta po rassmotreniyu stojkikh organicheskikh zagryaznitelej o rabote tret'ego soveshchaniya. Dobavlenie. Harakteristika riskov, svyazannyh s primeneniem pentachlorbenzola. UNEP/POP/PORC.3/20/Add.7 [Report of the Committee for the Review of Persistent Organic Pollutants on the third meeting. Appendix. Characterization of risks associated with the use of pentachlorobenzene UNEP/POP/PORC.3/20/Add.7]. 2007, 24 p. (in Russian)
2. Bailey R. E., van Wijk D., Thomas P. C. Sources and Prevalence of Pentachlorobenzene in the Environment. *Chemosphere*, 2009, vol. 75 (5), pp. 555–564. doi:/10.1016/j.chemosphere.2009.01.038
3. Gong W., Fiedler H., Liu X., Wang B., Yu G. Emission Factors of Unintentional HCB and PeCBz and Their Correlation with PCDD/PCDF. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 230 pp. 516–522. doi:/10.1016/j.envpol.2017.05.082
4. Hogendoorn E. A., Y de Bruin B., Janssen M. P. M. Inventory Emission Factors for Pentachlorobenzene, 2009, 22 p.
5. Lin X., Huang Q., Chen T., Li X., Lu S., Wu H., Yan J., Zhou M., Wang H. PCDD/F and PCBz Emissions during Start-up and Normal Operation of a Hazardous Waste Incinerator in China. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, vol. 14, pp. 1142–1151. doi:/10.4209/aaqr.2013.03.0068

6. Kim, K.-S., Hong K.-H., Ko Y.-H., Kim M.-G. Emission Characteristics of PCDD/Fs, PCBs, Chlorobenzenes, Chlorophenols, and PAHs from Polyvinylchloride Combustion at Various Temperatures. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2004, vol. 54 (5), pp. 555–562. doi:/10.1080/10473289.2004.10470925
7. Wikstrom E., Tysklind M., Marklund S. Influence of Variation in Combustion Conditions on the Primary Formation of Chlorinated Organic Micropollutants during Municipal Solid Waste Combustion. *Environmental Science & Technology*, 1999, vol. 33, pp. 4263–4269. doi:/10.1021/es990568b
8. Chlorinated Dioxins & Related compounds. Impact on the Environment. Ed. O. Hutzinger, R. W. Frei, E. Merian, and F. Pocchiari. *Science*, 1982, 658 p.
9. Fangmark I., van Bavel B., Marklund S., Strandberg B., Serge N., Rappet Ch. Influence of Combustion Parameters on the Formation of Polychlorinated Dibenz-p-dioxins, Dibenzofurans, Benzenes, and Biphenyls and Polyaromatic Hydrocarbons in a Pilot Incinerator. *Environmental Science & Technology*, 1993, vol. 27, pp. 1602–1610. doi:/10.1021/es00045a016
10. Zimmermann R., Blumenstock M., Heger H. J., Schramm K.-W., Kettrup A. Emission of Nonchlorinated and Chlorinated Aromatics in the Flue Gas of Incineration Plants during and after Transient Disturbances of Combustion Conditions: Delayed Emission Effects. *Environmental Science & Technology*, 2001, vol. 35, pp. 1019–1030. doi:/10.1021/es000143
11. Ahling B., Bjorseth A., Lunde G. Formation of chlorinated hydrocarbons during combustion of poly (vinyl chloride). *Chemosphere*, 1978, vol. 10, pp. 799–806. doi:/10.1016/0045-6535(78)90063-2
12. Kaune, A., Lenoir, D., Nikolai, U., Kettrup, A., Estimating concentrations of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the stack gas of a hazardous waste incinerator from concentrations of chlorinated benzenes and biphenyls. *Chemosphere*, 1994, vol. 29, pp. 2083–2096. doi:/10.1016/0045-6535(94)90376-X
13. Oberg T., Aittola J.-P., Bergström J. G. T. Chlorinated aromatics from the combustion of hazardous waste. *Chemosphere*, 1985, vol. 14, pp. 215–221. doi:/10.1016/0045-6535(85)90100-6
14. Yan M., Li X., Chen T., Lu Sh., Yan J., Cen K. Effect of temperature and oxygen on the formation of chlorobenzene as the indicator of PCDD/Fs. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, vol. 22(10), pp. 1637–1642. doi:/10.1016/S1001-0742(09)60300-4
15. Tiernan T. O., Taylor M. L., Garrett J. H., VanNess G. F., Solch J. G., Deis D. A., Wagel D. J., Chlorodibenzodioxins, chlorodibenzofurans and related compounds in the effluents from combustion processes. *Chemosphere*, 1983, vol. 12, pp. 595–606. doi:/10.1016/0045-6535(83)90217-5
16. Kato M., Urano K., Convenient substitute indices to toxic equivalent quantity for controlling and monitoring dioxins in stack gas from waste incineration facilities. *Waste Manage*, 2001, vol. 21, pp. 55–62. doi:/10.1016/s0956-053x(00)00048-9
17. Akimoto Y., Nito S., Inouye Y., Comparative study on formations of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans and related compounds in a fluidized bed solid waste incinerator using long term used sand and fresh sand. *Chemosphere*, 1997, vol. 34, pp. 791–799. doi:/10.1016/S0045-6535(97)00007-6
18. Jay K., Stieglitz L. Identification and quantification of volatile organic components in emissions of waste incineration plants. *Chemosphere*, 1995, vol. 30, pp. 1249–1260. doi:/10.1016/0045-6535(95)00021-Y
19. Li Y., Yang Y., Yu G., Huang J., Wang B., Deng Sh., Wang Y. Emission of unintentionally produced persistent organic pollutants (UPOPs) from municipal waste incinerators in China. *Chomsphere*, 2016, vol. 158, pp.17–23. doi:/10.1016/j.chemosphere.2016.05.037
20. Mi Y. Xiao-dong L. Tong Ch. Sheng-yong L., Jian-hua Y. Investigation of PCDD/Fs Indicators in Flue Gas from Waste Incinerators. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2010, vol. 16(3), pp. 257–261.
21. Zhang T., Fiedler H., Yu G., Solorzano Ochoa G., Carroll Jr W. F., Gullett B. K., Marklund S., Touati A. Emissions of unintentional persistent organic pollutants from open burning of municipal solid waste from developing countries. *Chemosphere*, 2011, vol. 84, pp. 994–100. doi:/10.1016/j.chemosphere.2011.04.070
22. Nguyen T. H., Nguyen T.P.M. Emission characterization of PeCB, HCB and their correlation in fly and bottom ashes from various thermal industrial processes in Northern Vietnam. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2020, vol. 2, pp. 378–391. doi:/10.1016/j.chemosphere.2011.04.070doi:/10.1080/10807039.2020.1718486
23. Nguyen H. T., Nguyen T. T. T., Tung N. H., Hoang A. Q., Pham L. H., Minh T. B. Levels, profiles, and emission characteristic of chlorobenzenes in ash samples from some industrial thermal facilities in northern Vietnam. *Environmental Science and Research*, 2018, vol. 26 (1), pp. 188–198. doi:/10.1007/s11356-018-3591-9
24. Hue N. T., Thuy N. T. T., Tung N. H. Polychlorobenzenes and polychlorinated biphenyls in ash and soil from several industrial areas in North Vietnam: residue concentrations, profiles and risk assessment. *Environmental Geochemistry Health*, 2015, vol. 38 (2), pp. 399–411. doi:/10.1007/s10653-015-9726-8
25. Nguyen T. T. T., Hoang A. Q., Nguyen V. D., Nguyen H. T., Van Vu T., Vuong X. T., Tu M. B., Concentrations, profiles, emission inventory, and risk assessment of chlorinated benzenes in bottom ash and fly ash of municipal and medical waste incinerators in northern Vietnam. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 28 (11), pp. 13340–13351. doi:/10.1007/s11356-020-11385-9
26. Zhang H., Jiang L., Zhou X., Zeng T., He Z., Huang X., Chen J., Song S. Determination of hexachlorobutadiene, pentachlorobenzene, and hexachlorobenzene in waste incineration fly ash using ultrasonic extraction followed by column cleanup and GC-MS analysis. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 2018, vol. 410, pp. 1893–1902. doi:/10.1007/s00216-018-0849-5
27. Nie Z., Liu G., Liu W., Zhang B., Zheng M. Characterization and quantification of unintentional POP emissions from primary and secondary copper metallurgical processes in China. *Atmospheric Environment*, 2012, vol. 57, pp. 109–115. doi:/10.1016/j.atmosenv.2012.04.048

28. Yang Y., Yang L., Wang M., Yang Q., Liu X., Shen J., Liu G., Zheng M. Concentrations and profiles of persistent organic pollutants unintentionally produced by secondary nonferrous metal smelters: Updated emission factors and diagnostic ratios for identifying sources. *Chemosphere*, 2020, 8 p. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126958
29. Aittola J. P., Paasivirta J., Vattulainen A., Sinkkonen S., Koistinen J. and Tarhanen J. Formation of chloroaromatics at a metal reclamation plant and efficiency of stack filter in their removal from emission. *Chemosphere*, 1996, vol. 32 (1), pp. 99–108. doi:/10.1016/0045-6535(95)00236-7
30. Westberg H. B., Seldén A. I., Bellander T. Emissions of some organochlorine compounds in experimental aluminum degassing with hexachloroethane. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 1997, vol.12 (3), pp. 178–183. doi:/10.1080/1047322X.1997.10389485
31. Li Y. Q., Zhan M. X., Chen T., Zhang J., Li X. D., Yan J. H., Buekens A. Formation, reduction and emission behaviors of CBzs and PCDD/Fs from cement plants. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, vol. 16 (8), pp. 1942–1953. doi:/10.4209/aaqr.2016.01.0045
32. Reports Dashboard Stockholm Convention. Available at: [http://ers.pops.int/eRSodataReports2/ReportSC\\_Dash-Board.html](http://ers.pops.int/eRSodataReports2/ReportSC_Dash-Board.html) (accessed March 15, 2022).
33. Regulation (EC) No 166/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the establishment of a European Pollutant Release and Transfer Register and amending Council Directives 91. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32006R0166> (accessed October 28, 2022).
34. Pentachlorobenzene (QCB) and TetrachlorobenzeneS (TECBS). Proposed Risk Management Strategy. *Chemicals Control Branch Environmental Protection Service*, 2005, 21 p.
35. Cement statistics and Information. Available at: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cement-statistics-and-information> (accessed October 28, 2022).
36. TRI data and tools. Available at: <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/tri-data-and-tools> (accessed October 10, 2022).

#### Информация об авторах

*Мальчихина Анна Васильевна* – старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: anna.machihina@gmail.com

*Какарека Сергей Витальевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией трансграничного загрязнения, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: sk001@yandex.ru

#### Information about the authors

*Hanna V. Malchykhina* – Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: anna.machihina@gmail.com

*Sergey V. Kakareka* – D. Sc. (Technical), Professor, Head of Laboratory of Transboundary Pollution, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: sk001@yandex.ru

## ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПРИГОРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ МИНСКА

М. И. Струк, С. Г. Живнач

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Приведена оценка современной организации природных экосистем пригородной территории Минска. В их составе преобладают леса, в распределении которых проявляется обратная зависимость от расстояния до города. В ближнем к нему 20-километровом поясе лесистость является минимальной, раздробленность лесов – наивысшей. На данный пояс приходится также размещение большинства водохранилищ водохозяйственного и рекреационного назначения. Они построены на малых реках и имеют низкую устойчивость к внешним воздействиям и высокую зависимость от экологического состояния водосборных бассейнов.

Определены перспективные угрозы природным экосистемам, обусловленные повышением антропогенных нагрузок на них в связи с формированием Минской городской агломерации, а также климатическими изменениями. Они увеличивают риски застройки этих экосистем, загрязнения атмосферного воздуха и вод, гибели леса, возникновения природных пожаров, антропогенного эвтрофирования водоемов и др.

Предложены приоритетные направления планирования природных экосистем, адекватные перспективным угрозам и эколого-ресурсным потребностям города. Они включают, во-первых, формирование на их основе природного каркаса, ядрами которого должны послужить не только местные особо охраняемые природные территории, но и основные водоемы с прилегающими к ним лесами, во-вторых, реализацию специфических планировочных мер по отношению к отдельным типам природных экосистем для различных частей пригородной территории. Для ближней к городу части приоритетное значение имеет их сохранение, обеспечение взаимосвязи и целенаправленное преобразование, для удаленной – соблюдение экологически приемлемых режимов использования.

**Ключевые слова:** природные экосистемы; планирование; пригородная территория; лесистость; природный каркас.

**Для цитирования.** Струк М. И., Живнач С. Г. Приоритетные направления долгосрочного планирования природных экосистем пригородной территории Минска // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 157–170.

## PRIORITY DIRECTIONS FOR LONG-TERM PLANNING OF NATURAL ECOSYSTEMS IN THE SUBURBAN AREA OF MINSK

M. I. Struk, S. G. Zhivnach

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** An assessment of the actual organization of natural ecosystems in the suburban area of Minsk is given. Forests predominate among them. The distribution of forests shows an inverse dependence on the distance to the city. The forest cover is minimal in the 20-kilometer zone closest to the city, the fragmentation of forests, on the contrary, is the highest. This belt also accounts for the placement of most reservoirs for water management and recreational purposes. They are built on small rivers and have low resistance to external influences and high dependence on the ecological state of the catchment basins.

Perspective threats to natural ecosystems caused by an increase in anthropogenic loads on them due to the formation of the Minsk urban agglomeration, as well as climate change, have been identified. They will increase the risks of developing these ecosystems, air and water pollution, forest death, natural fires, anthropogenic eutrophication of water bodies, etc.

Priority directions for planning natural ecosystems, adequate to the long-term threats and environmental and resource needs of the city, are proposed. They include, firstly, the formation of a natural framework on their basis, the cores of which should be not only local specially protected natural areas, but also the main water bodies with adjacent forests, and secondly, the rationale for planning measures in relation to individual types natural ecosystems for various parts of the suburban area. For the part closest to the city, their preservation, ensuring interconnection and purposeful transformation are of priority importance, for the remote part – compliance with environmentally acceptable modes of use.

**Keywords:** natural ecosystems; planning; suburban area; wooded area; natural frame.

**For citation.** Struk M. I., Zhivnach S. G. Priority directions of long-term planning of natural ecosystems in the suburban area of Minsk. *Nature Management*, 2022, no 2, pp. 157–170.

**Введение.** Природные экосистемы, расположенные на прилегающей к крупному городу территории, характеризуется особенно тесными и разноплановыми связями с ним – экономическими, социальными, экологическими. Они выступают источником потребляемых городом природных ресурсов, в первую очередь, водных, создают материальную основу формирования мест отдыха и оздоровления городского населения, способствуют улучшению городской среды, ассимилируют выносимые из города загрязняющие вещества.

Для обеспечения эффективного выполнения указанными экосистемами отмеченных функций нужна их соответствующая организация. Вопросы эколого-географического обоснования такой организации применительно к пригородной территории Минска довольно детально рассматривались в проводившихся ранее исследованиях. Они затрагивали оценку ее природно-ландшафтного строения [1] и бассейновой дифференциации [2], экологического состояния ландшафтов [3] и водоемов [4], пространственного распределения лесов [5], формирования природного каркаса [6] на базе местных природных комплексов.

Конструктивное значение отмеченных разработок может быть реализовано на практике путем перспективного планирования рассматриваемых экосистем. Такое планирование является адекватным управлением инструментом, позволяющим достичь требуемых результатов. Особую значимость оно приобретает на агломерационной стадии городского развития.

Целью исследования выступило обоснование приоритетных направлений подобного рода планирования по отношению к пригородной территории Минска.

Решаемые задачи включили в себя:

- оценку современной организации природных экосистем изучаемой территории;
- выявление перспективных угроз и вызовов для них;
- обоснование приоритетных направлений планирования этих экосистем.

**Объекты и методы исследования.** Объектами исследования выступили природные экосистемы пригородной территории Минска: лесные, луговые, болотные и водные. Границы данной территории определены, исходя из размещения за пределами города природных экосистем, имеющих особенно важное значение для его функционирования. При этом принимались во внимание границы уже установленных для города пригородной и зеленой зон, поскольку в набор критериев их выделения входят осуществляемые природными экосистемами его экологические и рекреационные связи с окружающими территориями.

Зеленая зона города непосредственно ориентирована на удовлетворение его экологических и рекреационных потребностей. Она представляет собой территорию за пределами городской черты, занятую лесами, лесопарками и зелеными насаждениями. Ее назначение – способствовать оздоровлению воздушного бассейна города, смягчению неблагоприятных климатических явлений и служить местом отдыха населения.

Пригородная зона, наряду с обеспечением трудовых и производственных связей города с прилегающей к нему территорией, предусматривает также размещение в ее пределах рекреационных зон. Последние базируются на ресурсном потенциале природных экосистем, что является основанием для их включения в состав пригородной территории.

Общие границы указанной территории приняты по максимальному удалению от города границ обеих планировочных зон – пригородной и зеленой. Кроме того, в нее дополнительно включена также часть водосборного бассейна Вилейского водохранилища, которая не входит в состав установленных пригородной и зеленой зон. Целесообразность подобного включения объясняется ролью данного водохранилища как водоема-донора водных ресурсов для Минска и зависимостью его экологического состояния от всей площади водосборного бассейна.

Принятые границы пригородной территории удалены от городской черты примерно на 60 км. Сама данная территория занимает площадь 15,3 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет 38 % от территории Минской области. В ее состав входят 13 административных районов, из них 3 (Минский, Смолевичский, Дзержинский) полностью и 10 (Вилейский, Логойский, Борисовский, Червенский, Пуховичский, Узденский, Столбцовский, Воложинский, Молодечненский, Вилейский) – частично.

Научно-методическую основу исследования составил эколого-географический подход, адаптированный для пригородной территории. Он основан на представлениях об имманентно присущих природным экосистемам способностях выполнять средоформирующие и ресурсово-производящие функции [7] и эффективности такого выполнения в зависимости от типа, занимаемой площади и местоположения этих экосистем.

Адаптация указанного подхода применительно к пригородной территории предполагает совместное использование экосистемной исследовательской модели в сочетании с такими географическими моделями организации пространства, как ландшафтная, бассейновая, поясная и секторальная. Экосистемная модель предполагает проведение исследования по типу: «хозяин – дом», где роль «хо-

зяина» играет город с его потребностями, а «дома» – природные экосистемы пригородной территории. Соответственно, оценка эколого-ресурсных функций последних будет определяться именно их направленностью на удовлетворение данных потребностей. Определение подобной направленности должно осуществляться исходя из положения пригородных природных экосистем в пределах соответствующих ландшафтов, бассейнов, поясов и секторов.

Исследование выполнено на основе обобщения материалов упомянутых выше предыдущих разработок авторов, дополненных данными планировочной градостроительной нормативной документации, схем территориального планирования, а также программ и стратегий государственного социально-экономического прогнозирования.

#### **Результаты исследования.**

**Современная организация природных экосистем пригородной территории и их устойчивость к внешним воздействиям.** Организацию природных экосистем пригородной территории определяет взаимодействие двух основных факторов: ее природно-ландшафтного строения и удаленности от города. Первый из них оказывает влияние на пригодность территории для хозяйственного освоения, второй – на его интенсивность.

Основной особенностью природно-ландшафтного строения пригородной территории Минска является приуроченность ее центральной части к Минской возвышенности, которая характеризуется самыми высокими гипсометрическими отметками, превышающими 200 и местами 300 м. В северном и южном направлении высоты снижаются, располагаясь в интервале 150–200 м.

Каждому из приведенных высотных уровней соответствуют свои типы ландшафтов. В соответствии с их пространственным распределением, на рассматриваемой территории выделены три ландшафтных района (рис. 1). В ее центральной части это район преимущественного распространения ландшафтов холмисто-моренно-эрэзионных и камово-моренно-эрэзионных возвышенностей. В северной – вторичноморенных и водноледниковых равнин с небольшой долей озерно-аллювиальных низин. В юго-восточной – вторичных водно-ледниковых равнин и болотных ландшафтов. Два первых отмеченных района будут относиться к Белорусской возвышенной и третий – к Предполесской ландшафтной провинции.

Приведенное районирование отражает внутренние пространственные различия в природно-ландшафтных предпосылках природопользования на пригородной территории, а также ее устойчивости к внешним воздействиям. Сравнительно высокое в целом плодородие почв способствует повышенному сельскохозяйственному освоению территории и меньшей сохранности природных экосистем в ее пределах.

Ландшафтной организацией территории определяется ее устойчивость к внешним воздействиям. В обобщенном виде более устойчивыми к накоплению загрязняющих веществ, а также изменению уровня грунтовых вод и менее устойчивыми к механическим воздействиям, сопровождающим сведение естественной растительности, являются возвышенные ландшафты. Низинные ландшафты наоборот характеризуются пониженной устойчивостью к первым двум видам воздействий и повышенной – к третьему виду. Средневысотные ландшафты занимают промежуточное положение.

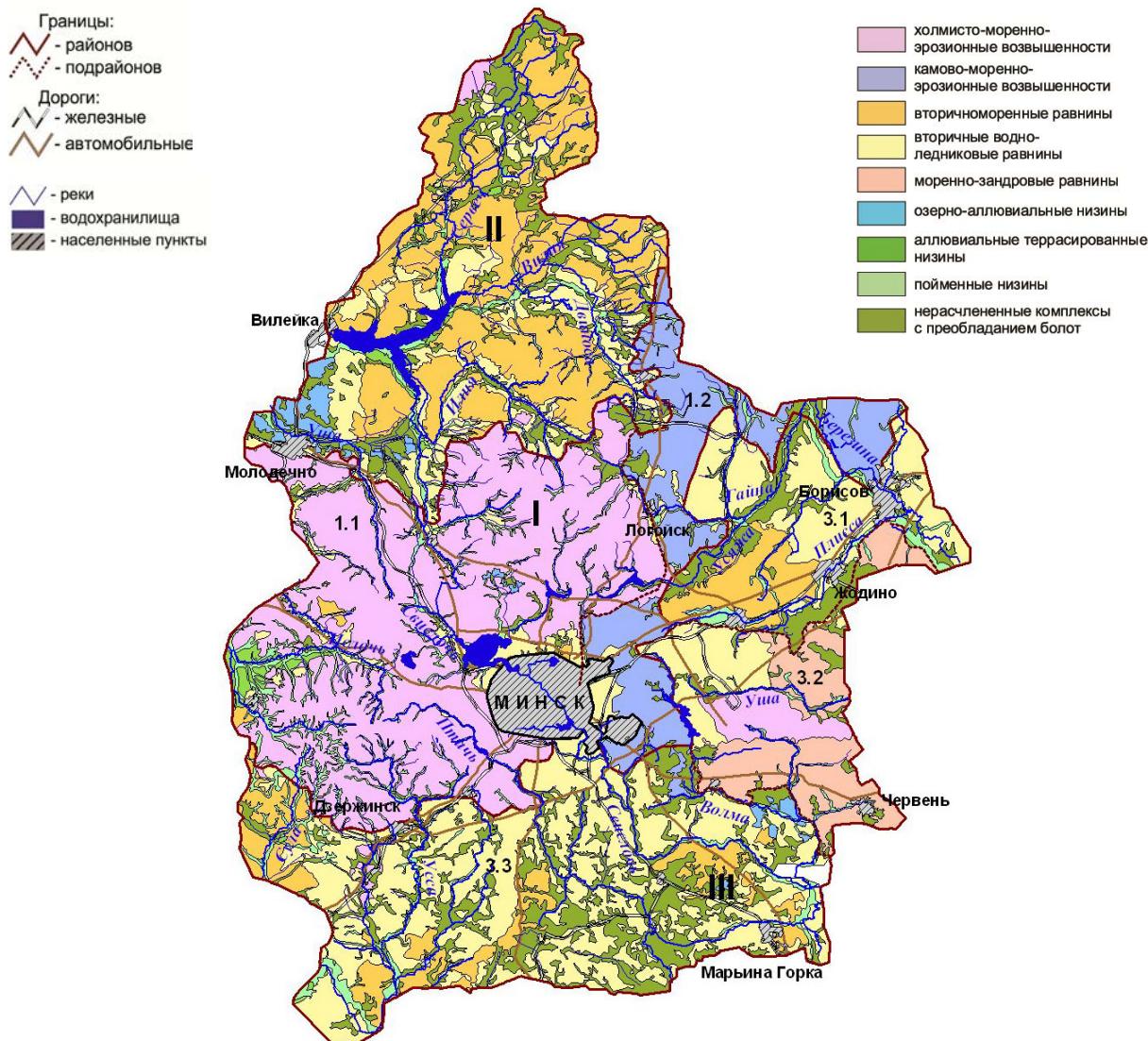
В соответствии с распределением ландшафтов различного высотного уровня в выделенных ландшафтных районах, устойчивость последних к механическим воздействиям будет самой низкой в центральном и самой высокой – в южном районе. По отношению к накоплению загрязняющих веществ и изменению уровня грунтовых вод ситуация будет обратной.

Влияние второго фактора организации пригородных природных экосистем, связанного с удалением территории от города, проявляется в последовательном снижении интенсивности природопользования по мере такого удаления. Вблизи города размещаются необходимые для обеспечения его функционирования объекты коммунального назначения и энергетики, складские помещения и др. Для этой части пригородной территории характерна большая густота дорожной сети, а также концентрация населенных пунктов (табл. 1).

**Таблица 1. Плотность автомобильных дорог и суммарная доля площади, занимаемой населенными пунктами по поясам пригородной территории Минска, расположенным на различном удалении от города**

**Table 1. The density of roads and the total share of the area occupied by settlements along the belts of the suburban area of Minsk, located at different distances from the city**

Показатель	Пояса с удалением от города, км					
	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60
Плотность автомобильных дорог, км/100 км <sup>2</sup>	54	62	32	26	29	25
Суммарная доля площади, занимаемой населенными пунктами, %	19,0	11,1	10,4	6,1	6,4	6,1



**Рис. 1. Природно-ландшафтные районы пригородной территории Минска:**  
**I – район возвышенных холмисто-моренно-эрзационных и камово-моренно-эрзационных ландшафтов (1.1 – подрайон холмисто-моренно-эрзационных возвышенностей, 1.2 – подрайон камово-моренно-эрзационных возвышенностей); II – район равнинных вторичноморенных в сочетании с вторичными водно-ледниковыми, озерно-аллювиальными и болотными ландшафтами; III – район ландшафтов вторичных водно-ледниковых равнин и болотных ландшафтов (3.1 – подрайон вторичных водно-ледниковых равнин в сочетании с вторичноморенными равнинами и заболоченными речными долинами, 3.2 – подрайон водно-ледниковых и морено-зандровых равнин, 3.3 – подрайон вторичных водно-ледниковых ландшафтов со значительным распространением болотных ландшафтов)**

**Fig.1. Landscape zoning of the suburban area of Minsk:**  
**I – the area of elevated hilly moraine-erosion and kame-moraine-erosion landscapes (1.1 – hilly moraine-erosion uplands, 1.2 – kame-moraine-erosion uplands); II – the area of the plains secondary moraine in combination with secondary fluvioglacial, lake-alluvial and wetland landscapes; III – area landscapes secondary fluvioglacial plains and wetland landscapes (3.1 – secondary fluvioglacial plains in combination with secondary morainic plains and swampy river valleys, 3.2 – fluvioglacial and moraine-zandre plains, 3.3 – secondary fluvioglacial landscapes with a significant distribution of wetland landscapes)**

Плотность автомобильных дорог на расстоянии 20 км от города почти в 2 раза выше, нежели на большем удалении. Суммарная доля площади, занимаемой населенными пунктами, в радиусе до 10 км от городских границ также примерно в 2 раза превышает таковую в последующих двух 10-километровых поясах и в 3 раза – более удаленных. При этом в ближнем радиусе данную площадь формируют исключительно сельские поселения – Колодищи, Мачулищи, Ратомка и др.

Уменьшение степени хозяйственного освоения пригородной территории в соответствии с ее удалением от города создает предпосылки обратного распространения природных экосистем – повышения занимаемой ими площади в данном направлении.

Структуру природных экосистем пригородной территории Минска образуют все их основные типы: лесные, луговые, болотные и водные. Совместно они занимают 44 % ее площади, из которых на водные приходится лишь около 2 %. В составе наземных преобладают лесные экосистемы – 89 %, далее следуют луговые – 8 и болотные – 3 %.

Среди типов природных комплексов наивысшей эколого-рекреационной эффективностью обладают леса [8, 9]. Им присущи следующие экосистемные функции [10]:

- климаторегулирующие (регулирования температурного режима за счет депонирования основного парникового газа – CO<sub>2</sub>);
- водоохраные и водорегулирующие (регулирование водного режима рек, озер, водохранилищ и иных водных объектов, предотвращение поступления в них загрязняющих веществ и продуктов эрозии, защита берегов рек и др.);
- защитные (защита от эрозии почв сельскохозяйственных земель);
- санитарно-гигиенические и оздоровительные (снижение загрязнения атмосферного воздуха, обогащение его фитонцидами, создание благоприятного микроклимата и др.);
- рекреационные (природно-ресурсный потенциал рекреационного и туристического использования территории, сохранение природного окружения памятников истории и культуры);
- сохранения биологического и ландшафтного разнообразия (сохранение уникальных природных комплексов и в их пределах ценных видов флоры и фауны).

Первая из приведенных функций имеет преимущественно глобальное значение. Ее выполняют все леса, где бы они ни находились. Последняя – определяется свойствами лесов, также независимо от их местоположения. Пригородные леса, очевидно, вносят вклад в регулирование глобального климата и сохранение биологического и ландшафтного разнообразия. Однако для них более значимыми являются все же остальные из перечисленных функций, которые ориентированы на окружающую среду города и могут максимально эффективно выполняться именно этими лесами.

Представленный перечень функций с различной степенью интенсивности выполняется и иными типами природных комплексов. По отношению к пригородной территории особенно важной для луговых комплексов является водоохранная роль, которая обеспечивается за счет создания ими барьера на пути миграции продуктов почвенной эрозии и загрязняющих веществ в водотоки и водоемы, для болотных – водорегулирующая и водоохранная, для водных – водохозяйственная и рекреационная роли.

Внутри самих типов природных комплексов имеется свое деление по эффективности выполнения тех или иных экосистемных функций. Так, в самом общем виде водоохранную и водорегулирующую функции более полно выполняют: в составе лесов – хвойные и твердолиственные леса, лугов – пойменные луга, болот – верховые болота.

Большая часть лесов рассматриваемой территории расположена в пределах Минско-Борисовского геоботанического района [11]. Для него характерно доминирование сосновых лесов с примесью ельников и бородавчато-березовых лесов. Сосновые леса занимают больше половины лесопокрытой площади. Далее следуют еловые и мелколиственные леса. Широколиственные леса распространены мало.

В составе лесов преобладают некоренные сообщества – псевдокоренные, производные, лесные культуры, которые занимают примерно 3/4 лесной площади. Эти сообщества по сравнению с коренными лесами в большей степени уязвимы к внешним воздействиям.

Средняя лесистость всей рассматриваемой территории составляет 37 %, что является достаточным для сохранения на ней экологического равновесия [12]. В пространственном распределении лесов наблюдаются существенные различия, как по мере удаленности от города, так и по сторонам горизонта.

При удалении от города лесистость последовательно увеличивается (табл. 2). В ближнем 20-километровом поясе она является минимальной, не достигая 30 %, во втором (20–40 км) составляет 30–40 % и в третьем (40–60 км) превышает 40 %. По сторонам горизонта самая низкая лесистость наблюдается в юго-восточном секторе – меньше 20 %, самая высокая отмечается в северо-западном и северном – более 40 %.

Аналогичным образом распределяется также контурность лесов. Размеры лесных участков увеличиваются в соответствии с ростом лесистости территории. Наиболее сильная фрагментация и изолированность лесных угодий отмечается на непосредственно прилегающей к городу территории. Так, средняя площадь лесных участков в радиусе 20 км от городских границ составляет около 4 км<sup>2</sup>, что в 4 раза меньше, нежели на удалении свыше 40 км. Подобное дробление лесов снижает их экологический потенциал и устойчивость к внешним воздействиям.

**Таблица 2. Лесистость и средний размер лесных участков по поясам пригородной территории Минска, расположенным на различном удалении от города**

**Table 2. Forest cover and average size of forest plots along the belts of the suburban area of Minsk, located at different distances from the city**

Показатель	Пояса с удалением от города, км					
	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60
Лесистость, %	23	21	31	36	43	45
Средний размер лесных участков, га	395	360	640	730	1600	1620

Естественные луга имеют небольшое распространение на пригородной территории Минска. Их пойменные и суходольные разновидности распределяются примерно поровну. Большую экологическую значимость имеют пойменные луга, создающие барьер на пути проникновения загрязняющих веществ с поверхностным стоком в реки.

Болота, как и луга, распространены ограниченно. Представлены верховым и низинным типами. Сохранившиеся болотные массивы, как правило, небольшие по площади. Наиболее крупные из них размещаются в южной части пригородной территории.

Водные экосистемы представлены преимущественно реками и водохранилищами. Речную сеть пригородной территории формируют, главным образом, водотоки, которые относятся к категории малых, их длина не превышает 100 км. Малые реки характеризуются самой низкой устойчивостью к внешним воздействиям. Они дренируют, как правило, только верхний маломощный водоносный горизонт четвертичных отложений, что обуславливает высокую зависимость их режима и экологического состояния от водосборных бассейнов.

Построенные на малых реках основные пригородные водохранилища в большинстве своем приурочены к их верхним частям, что повышает зависимость качества вод этих водоемов от экологического состояния их водосборных бассейнов, имеющих небольшие площади – от 86 км<sup>2</sup> (водохранилище Стайки на р. Тростянке) до 214 км<sup>2</sup> (водохранилище Петровичское на р. Волме). Подобное в меньшей мере относится к Вилейскому водохранилищу, которое создано в месте слияния трех рек – Сервечи, Вилии и Илии, и имеет площадь водосборного бассейна 4,1 тыс. км<sup>2</sup>.

Водохранилища, по сравнению с реками, более уязвимы к воздействиям поступающих в них загрязняющих веществ. Для самих водохранилищ существенными характеристиками, определяющими их способность противостоять загрязнению, являются объем воды, проточность и глубина [13–16].

Большая часть пригородных водохранилищ по указанным параметрам отличается сравнительно низкой устойчивостью к внешним воздействиям. К более устойчивым относятся водохранилища Вилейско-Минской водной системы. Главное значение среди них занимает Вилейское водохранилище, которое выступает водоемом-донором для каскада водохранилищ, построенных на р. Свислочи (Заславское, Криница, Дрозды), и имеет самую большую водосборную площадь, а также объем водной массы, превышающий таковой каждого из водохранилищ, не входящих в данную систему, более чем в 10 раз.

**Перспективные вызовы и угрозы для природных экосистем.** Перспективные вызовы и угрозы природным экосистемам пригородной территории связаны, главным образом, с социально-экономическим развитием ее самой, города, а также с изменениями климата. В первом случае особое значение имеет динамика численности населения и функционирования производственного комплекса, оказывающая влияние на использование местных природных ресурсов и определяющая нагрузки на окружающую среду.

Ключевым фактором социально-экономического развития территории является принятие управленческое решение о формировании Минской городской агломерации. Оно предусматривает прекращение экстенсивного роста города Минска, ограничение численности его населения и формирование на базе пригородных городских поселений городов-спутников – Дзержинска, Заславля, Логойска, Руденска, Смолевич, Фаниполя [17]. К ним примкнет еще один новый город с численностью населения до 155 тыс. человек, который планируется построить на территории Китайско-Белорусского индустриального парка. Границы агломерации определены в радиусе около 40 км от Минска.

В процессе формирования городской агломерации прогнозируется увеличение численности ее населения, а также рост производственного потенциала. По расчетам УП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА» подобная численность должна возрасти к 2030 г. примерно на четверть [18]. В промышленном комплексе прогнозируются реструктуризация предприятий и повышение качества продукции путем внедрения научноемких и высокотехнологичных производств, таких как микроэлектроника, приборостроение, точное машиностроение, информационные технологии. Также намечается

создание новых специализированных производств, использующих современные технологии и передовые научные разработки и имеющих высокую добавленную стоимость.

Отличительной особенностью предстоящего этапа промышленного развития агломерации выступает переориентация в размещении новых предприятий с основного города на города-спутники. Кроме того, пригородная территория должна явиться местом, куда будет перенесен ряд предприятий, выносимых из него.

Прогнозируемое социально-экономическое развитие агломерации, перенос селитебной и производственной активности с основного города на города-спутники создают предпосылки для усиления нагрузок на природные экосистемы пригородной территории. В связи с ростом численности населения, объема промышленного и сельскохозяйственного производства, движения транспорта можно ожидать увеличения площади застройки пригородной территории, использования водных ресурсов, выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, сбросов сточных вод в поверхностные водоемы, образования отходов производства и потребления, рекреационных нагрузок.

Указанные воздействия способны повысить угрозы для природных комплексов, связанные с отводом участков природных экосистем под жилую и производственную застройку, строительством объектов инфраструктуры и обслуживания основного города и городов-спутников, ослаблением лесной растительности вследствие загрязнения атмосферного воздуха, загрязнением пригородных водоемов и водотоков сточными водами и поверхностным стоком с сельскохозяйственных и селитебных земель, рекреационной деградацией лесов. В составе этих угроз в качестве более значимых, по-видимому, следует рассматривать таковые, обусловленные ростом численности населения.

Угрозы, вытекающие из прогнозируемого развития производственного комплекса, могут быть компенсированы его запланированным переходом к моделям «зеленой» и «циркулярной» экономики [19, 20]. Первая из них ориентирует на экологизацию промышленного производства путем внедрения «зеленых» технологий и оборудования, возобновляемых и альтернативных источников энергии, модернизации традиционных отраслей промышленности, максимально полной переработки отходов.

В сельском хозяйстве, которое выступает основным источником загрязнения пригородных водохранилищ, прогнозируется техническое переоснащение производства с переходом на ресурсосберегающие технологии в растениеводстве, животноводстве и переработке сельскохозяйственной продукции. Планируются применение водо- и почvosберегающих агротехнологий, развитие органического земледелия и внедрение его адаптивно-ландшафтных систем.

«Циркулярная» экономика ориентирована на замкнутый материальный цикл ресурсного обеспечения, снижение потребления всех видов сырьевых и топливно-энергетических ресурсов на основе оптимизации производственных процессов, внедрение в производство технологических и социальных инноваций. Становление «циркулярной» экономики призвано решить, прежде всего, проблему отходов, включая минимизацию их образования, а также максимальное извлечение вторичных материальных ресурсов и их вовлечение в хозяйственный оборот.

В намечаемом улучшении экологических характеристик производства решающая роль принадлежит мерам технологической направленности, реализация которых требует инвестиций. Поэтому основным условием подобного улучшения и ограничения роста нагрузок на пригородные природные экосистемы выступит способность хозяйствующих субъектов к привлечению инвестиций на проведение технологического преобразования предприятий, а также создание индустрии переработки отходов.

Наряду с антропогенной деятельностью существенное влияние на состояние природных экосистем оказывают климатические изменения. Особенно заметно оно проявляется в период современного потепления климата, начало которого приходится на вторую половину 1980-х годов [21].

За время с 1989 по 2018 г. среднегодовая температура воздуха в Беларуси превысила климатическую норму на 1,3 °C [22]. Среднее годовое количество осадков практически сохранилось на прежнем уровне. В то же время существенные изменения произошли в их внутригодовом распределении. Зимой осадков стало больше, а летом и в начале осени – меньше, что привело к увеличению повторяемости засух.

Согласно выполненным прогнозам в Беларуси к 2039 г. ожидается увеличение среднегодовой температуры воздуха примерно на 1 °C, а к 2069 г. – на 2 °C. Длительность периода вегетации повысится почти на 2 недели и 1 месяц соответственно. Среднегодовое количество осадков возрастет на 5–8 %, преимущественно за счет зимнего и весеннего сезонов. Летом оно останется практически неизменным.

В связи с прогнозируемым потеплением климата существует вероятность роста повторяемости экстремальных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений с увеличением риска распространения болезней и вредителей леса, появления их новых, более агрессивных форм. Повышение

средних температур воздуха в весенние и летние месяцы приведет к увеличению продолжительности пожароопасного сезона.

Увеличение частоты засушливых явлений вызовет снижение устойчивости насаждений и угрозу их гибели. Особенно сильно это может затронуть еловые насаждения.

Усиление засушливости климата может оказаться негативно на болотных экосистемах [23]. Понижение уровня грунтовых вод приводит к застанию низинных болот кустарниками и деревьями – ивой, березой, ольхой, следствием чего является сокращение местного биоразнообразия. Верховые болота при повышении температуры и недостатке влаги интенсивно застают сосной.

Кроме того, в засушливые периоды возрастает риск возникновения пожаров, которые охватывают большие площади и являются сложными для тушения. В наибольшей мере подобный риск касается нарушенных торфяных болот.

Климатические изменения способствуют интенсификации негативного для всех природных экосистем – лесных, луговых, болотных, водных – процесса проникновения в них инвазивных чужеродных видов. Происходит ускорение экспансии новых видов, а также увеличивается агрессивность их воздействия на аборигенные виды и сообщества.

На пригородной территории указанный процесс проявляется более активно. Это связано, во-первых, с густой дорожной сетью в ее пределах и высокой интенсивностью транспортных потоков. Во-вторых, для данной территории характерна большая раздробленность естественных экосистем, их изолированное положение. Именно такие экосистемы в максимальной мере подвергаются неблагоприятным изменениям, вызванным экспансией инвазивных видов.

Климатические изменения сказываются как на наземных, так и на водных экосистемах. Это касается, прежде всего, гидрологического и температурного режимов водных объектов, которые определяют ход происходящих в них гидрохимических и биохимических процессов и в итоге – качество вод. Для основных водоемов пригородной территории Минска, представленных водохранилищами, повышение температуры воды, содержащей большие дозы биогенных веществ, будет иметь особенные неблагоприятные последствия, связанные с усилением их антропогенной эвтрофикации.

**Приоритетные направления планирования природных экосистем.** Формирование Минской городской агломерации должно сопровождаться созданием единого для нее экологического пространства. Для этого нужна соответствующая организация пригородных природных экосистем, а также приведение их в такое состояние, которое позволяет им успешно выполнять соответствующие функции и противостоять возникающим угрозам.

Основным требованием планировочной организации рассматриваемых экосистем выступает, прежде всего, обеспечение их пространственной взаимосвязи, что повышает экологический потенциал этих экосистем и устойчивость к внешним воздействиям. Кроме того, существенное значение имеет также выделение наиболее значимых экосистем с тем, чтобы не допустить их нарушений в процессе дальнейшего хозяйственного освоения территории.

Оптимальной формой организации природных экосистем, удовлетворяющей обоим отмеченным требованиям, является природный каркас. Он определяется как ранжированная по степени экологического значения система переходящих друг в друга участков природы, неразрывная взаимосвязь которых создает предпосылки для сохранения экологического равновесия, способного противостоять антропогенным воздействиям [12]. Природный каркас является универсальной планировочной моделью, которая применима к территориям различного иерархического уровня и функционального типа. Вместе с тем его формирование по отношению к каждой из них должно проводиться с учетом ее природной, социально-экономической и экологической специфики, а также особенностей развития.

Природный каркас пригородной территории должен интегрировать в себе выполнение двух групп функций. Одна из них имеет региональное или общенациональное экологическое значение и связана с сохранением природного равновесия, а также биологического и ландшафтного разнообразия, вторая касается удовлетворения эколого-рекреационных потребностей жителей города.

Наиболее значимые природные экосистемы по первой из отмеченных групп функций имеют статус особо охраняемых природных территорий, крупнейшие из них являются ядрами национальной экологической сети [24, 25]. На пригородной территории Минска таких ядер не имеется, здесь расположены только относительно небольшие по площади заказники республиканского значения: Прилепский, Юхновский, Глебковка, Стиклево, Кайковский и др. Данные объекты в разработанной УП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА» Схеме комплексной территориальной организации Минского района отнесены к экологическим ядрам местного природно-экологического каркаса [18]. В качестве экологических коридоров, обеспечивающих взаимные связи между этими ядрами, выступают реки с их водоохранными зонами, а также пути миграции копытных животных.

Вместе с тем природный каркас пригородной территории не должен ограничиваться только указанными элементами. Их следует рассматривать лишь как одну из его составляющих. Вторую

составляющую должны образовать пригородные леса и водоемы, играющие ключевую роль в оздоровлении городской среды, водоснабжении города и организации отдыха городского населения. Эта роль определяется их местоположением, свойствами, а также интенсивностью использования.

Оздоровительная значимость пригородных природных экосистем зависит от их удаления от города. В непосредственной близости от него, особенно при наличии связи с городскими природными экосистемами, она является самой высокой. На пригородной территории Минска в данном отношении выделяется крупный лесной массив, примыкающий к городу с восточной стороны.

Высокой водохозяйственной и рекреационной значимостью обладают природные экосистемы водоемов, используемых для водоснабжения города, а также водоемов и прилегающих к ним лесов, которые выступают местами массового отдыха и оздоровления городского населения. К числу таких на пригородной территории Минска относятся следующие объекты: Вилейское водохранилище как водоем-донор; водохранилище Крылово, аккумулирующее водные ресурсы, поступающие по каналу Вилейско-Минской водной системы и используемые для водоснабжения города; водохранилища, построенные на малых реках, на базе которых созданы основные зоны отдыха жителей города – Заславское, Криница, Дрозды (р. Свислочь), Вяча (р. Вяча), Петровичское (р. Усяжа), Волма (р. Волма), Стайки (р. Тростянка), Птич (р. Птич).

Для предотвращения негативных изменений приведенных экосистем, которые не относятся к особо охраняемым природным территориям, но исключительно важны для города, целесообразно придать им статус экологических ядер природного каркаса пригородной территории. Такой статус позволит рассматривать их в качестве объектов, нуждающихся в особой охране, и придаст этим экосистемам дополнительную защиту от возможных нарушений.

Экологическое состояние водоемов, относимых к ядрам пригородного природного каркаса, зависит от состояния их водосборных бассейнов. Отсюда следует повышенная значимость расположенных в пределах этих бассейнов природных экосистем, поскольку именно они выполняют водоохранную и водорегулирующую роль. Соответственно, внутри самой пригородной территории будет выделена та ее часть, которая является приоритетной для природоохранной деятельности.

В размещении ядер природного каркаса обоих приведенных типов на пригородной территории Минска наблюдается их пространственная близость к городу. Большая часть этих ядер приходится на территорию, расположенную в ближнем 20-километровом радиусе от города (рис. 2). На большем удалении их количество снижается. Самым удаленным и самым крупным является ядро, образуемое Вилейским водохранилищем с прилегающими к нему лесами.

Представленные особенности организации природных экосистем и размещение рекомендуемых к формированию на их основе ядер пригородного природного каркаса следует принимать во внимание при перспективном планировании этих экосистем. Основные направления такого планирования включают в себя их сохранение, преобразование, использование и восстановление.

Все отмеченные направления применимы на данной территории, но их соотношение в ее разных частях должно быть различным. Для ближней к городу части, где доля природных комплексов невысока, а значимость, наоборот, наивысшая, более существенное значение имеет их сохранение и обеспечение взаимосвязи между ними, для удаленной – соблюдение установленных режимов использования. По отношению к отдельным типам природных экосистем выделяются следующие перспективные планировочные направления.

#### *Леса:*

- недопущение вырубок, рекреационное использование с соблюдением норм нагрузок, целенаправленное преобразование в лесопарки в местах массовой рекреации в ближней части пригородной территории, соблюдение экологически приемлемого лесопользования на удаленной части;
- реализация мероприятий по адаптации лесов к изменениям климата, предусмотренных соответствующей стратегией адаптации лесного хозяйства на период до 2050 г.;
- обеспечение приоритетного выбора лесного направления рекультивации деградированных экосистем в ближней части пригородной территории;
- озеленение населенных пунктов и облесение выводимых из оборота малоплодородных и подверженных интенсивной эрозии сельскохозяйственных земель на ближней части пригородной территории.

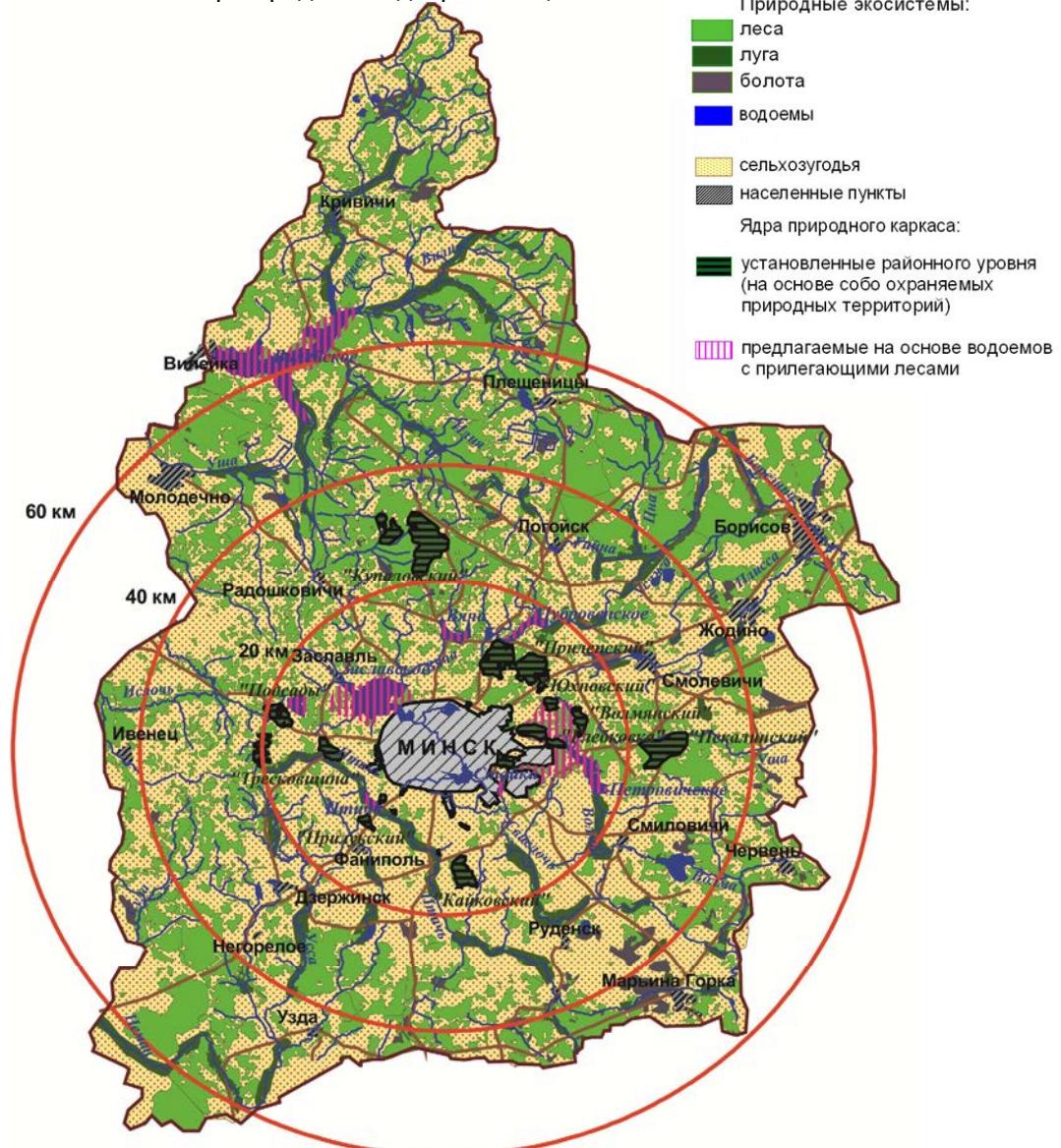
Приоритетное значение имеет сохранение лесных массивов, расположенных в непосредственной близости от города и в бассейнах малых рек, на которых построены основные пригородные водохранилища.

#### *Луга:*

- выявление мест размещения редких биологических видов, включенных в Красную книгу Республики Беларусь и ценных экосистем и реализация мероприятий по сохранению участков луговых угодий, обеспечивающих их существование;

- сохранение естественной трансформации частей луговых угодий, не имеющих в своем составе указанных видов и экосистем, в лесные фитоценозы, что приведет к уменьшению площади этих угодий, но не вызовет снижения экологического потенциала территории;
- сохранение существующего использования естественных луговых экосистем как пастбищ и сенокосов и реализация мер по уходу за ними.

Приоритетное значение имеет сохранение естественных луговых экосистем в поймах рек, на которых построены основные пригородные водохранилища.



**Рис. 2. Установленные и предлагаемые к созданию ядра природного каркаса пригородной территории Минска на основе водоемов и прилегающих к ним лесов**

**Fig. 2. The established and proposed for the organization cores of the natural frame, based on reservoirs and adjacent forests, in the suburban area of Minsk**

#### **Болота:**

- сохранение естественных болот как природных экосистем, обеспечивающих стабилизацию водного режима территории и формирующих ресурсный потенциал ее биоразнообразия в соответствии со стратегией сохранения и рационального использования торфяников на период до 2030 г.;
- повторное заболачивание выработанных и неиспользуемых осущенных торфяников для снижения пожарной опасности и восстановления их экосистемных функций.

Приоритетное значение имеет сохранение естественных болот в бассейнах рек, на которых построены основные пригородные водохранилища, а также повторное заболачивание нарушенных болот как потенциальных источников пожарной опасности.

#### **Водоемы:**

- разработка и реализация бассейновых схем управления водными ресурсами основных пригородных водохранилищ, используемых для водоснабжения города и рекреации городского населения;
- разработка и реализация проектов водоохранных зон рек, в первую очередь тех, на которых построены водохранилища;
- реконструкция водохранилищ, используемых и пригодных для рекреации и водоснабжения с целью обеспечения их благоприятного экологического и привлекательного эстетического состояния.

Приоритетное значение имеют водохранилища Вилейско-Минской водной системы как выполняющие исключительно важную водохозяйственную и рекреационную роль для Минска.

Для реализации приведенных планировочных направлений нужно действовать соответствующие управленческие механизмы. Они могут иметь отношение ко всей пригородной территории или к ее отдельным частям. В первом случае максимальное конструктивное значение должны принести создание зеленой зоны Минской городской агломерации в предложенных границах пригородной территории, разработка и реализация целевого проекта ее планировки, ориентированного на формирование природного каркаса на базе местных природных экосистем. Во втором случае предусматривается учет представленных направлений планирования природных экосистем при разработках схем территориального планирования, которые полностью или частично распространяются на пригородную территорию.

#### **Выводы.**

1. Природные экосистемы пригородной территории Минска занимают 44 % ее площади, в их составе более 4/5 приходится на леса, в размещении которых проявляется обратная зависимость от расстояния до города: в ближнем к нему 20-километровом поясе лесистость является минимальной (21–23 %), раздробленность лесов – наивысшей (площадь лесных участков – 0,4 км<sup>2</sup>), к периферии (40–60 км) соответствующие показатели увеличиваются в 2 и 4 раза соответственно.

2. Основные пригородные водоемы водохозяйственного и рекреационного назначения построены преимущественно на малых реках, в связи с чем они характеризуются низкой устойчивостью к внешним воздействиям и высокой зависимостью от экологического состояния местных водосборных бассейнов.

3. Перспективные угрозы природным экосистемам обусловлены повышением антропогенных нагрузок на них в связи с формированием Минской городской агломерации, которое будет сопровождаться ростом численности населения и производства, а также климатическими изменениями, увеличивающими риски гибели леса, возникновения природных пожаров, распространения инвазивных видов, антропогенного эвтрофирования водоемов.

4. Приоритетным направлением планировочной организации природных экосистем, адекватным как перспективным угрозам, так и эколого-ресурсным потребностям города, выступает формирование на их основе природного каркаса, ядрами которого должны послужить не только местные особо охраняемые природные территории, но и основные водоемы с прилегающими к ним лесами.

5. Основные планировочные меры применительно к отдельным типам природных экосистем должны определяться с учетом их размещения на пригородной территории – для ее ближней к городу части, приоритетное значение имеет их сохранение, обеспечение взаимосвязи и целенаправленное преобразование, что повысит экологический потенциал этих экосистем и их устойчивость к внешним воздействиям, для удаленной – соблюдение режимов использования, позволяющих сохранить данный потенциал.

#### **Список использованных источников**

1. Струк, М. И. Ландшафтно-экологическое районирование пригородной территории Минска / М. И. Струк, С. Г. Живнach // Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов : материалы XIII Междунар. ландшафтной конф., посвящ. столетию со дня рожд. Ф. Н. Милькова, Воронеж, 14–17 мая 2018 г. : в 2 т. / ред.: В. Б. Михно [и др.]. – Воронеж : ИСТОКИ, 2018. – Т. 1. – С. 436–438.
2. Струк, М. И. Бассейновый критерий организации природного каркаса пригородной территории (на примере Минска) / М. И. Струк, С. Г. Живнach // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 62–72.
3. Струк, М. И. Экологическая оценка ландшафтов пригородной территории / М. И. Струк, С. Г. Живнach // Городская среда: геоэкологические аспекты / В. С. Хомич [и др.]. – Минск, 2013. – С. 271–278.

4. Струк, М. И. Геоэкологическая оценка пригородных водохранилищ Минска / М. И. Струк, С. Г. Живнач, Г. М. Бокая // Природопользование. – 2013. – Вып. 23. – С. 115–124.
5. Струк, М. И. ТERRITORIALNAYA ORGANIZACIYA ZEMEL' PРИGORODNOY ZONЫ MINSKA / M. I. Struk, S. G. Zhivnach // Prirodopользование. – 2017. – Вып. 31. – С. 65–72.
6. Струк, М. И. Методика эколого-географического обоснования организации внешнего природного каркаса города / М. И. Струк, С. Г. Живнч // Природопользование. – 2016. – Вып. 30. – С. 86–95.
7. Преображенский, В. С. Основы ландшафтного анализа / В. С. Преображенский, Т. Д. Александрова, Т. П. Куприянова. – М. : Наука, 1988. – 192 с.
8. Владимиров, В. В. Расселение и экология / В. В. Владимиров. – М. : Стройиздат, 1996. – 392 с.
9. Паульявичюс, Г. Б. Роль леса в экологической стабилизации ландшафтов / Г. Б. Паульявичюс. – М. : Наука, 1989. – 215 с.
10. Экономика сохранения биоразнообразия : справочник / под ред. А. А. Тишкова. – М. : Проект ГЭФ «Сохранение биоразнообразия Российской Федерации», Институт экономики природопользования, 2002. – 604 с.
11. Гельтман, В. С. Географический и типологический анализ лесной растительности Белоруссии / В. С. Гельтман. – Минск : Наука и техника, 1982. – 326 с.
12. Реймерс, Н. Ф. Природопользование : словарь-справочник / Н. Ф. Реймерс. – М. : Мысль, 1990. – 637 с.
13. Коплан-Дикс, И. С. Роль минеральных удобрений в эвтрофировании вод суши / И. С. Коплан-Дикс, Г. В. Назаров, В. К. Кузнецов. – Л., 1985. – 184 с.
14. Оценка состояния загрязненности поверхностных вод в регионах освоения нефтяных и газовых месторождений и влияния на них данного вида антропогенного воздействия : рекомендации Р 52.24.557-96 / Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – М., 1997. – 54 с.
15. Морозова, О. Г. Факторы эвтрофикации экосистемы водоемов-охладителей и принципы оптимизации качества воды для технологических целей и аквакультуры : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 03.00.16 / О. Г. Морозова. – Красноярск 2003. – 40 с.
16. Доценко, Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ, гидролого-гидрохимические аспекты / Ю. С. Доценко. – М. : ГЕОС, 2007. – 252 с.
17. О развитии городов-спутников : Указ Президента Респ. Беларусь от 7 мая 2014 № 214 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://president.gov.by/ru/events/aleksandr-lukashenko-7-maja-podpisal-ukaz-214-o-razvitiu-gorodov-sputnikov-8716/>. – Дата доступа: 25.07.2022.
18. Схема комплексной территориальной организации Минского района. – Минск, 2015.
19. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. Одобрена протоколом заседания Президиума Совета Министров Республики Беларусь от 02.05.2017 № 10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf>. – Дата доступа: 12.09.2022.
20. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 года. Одобрена протоколом заседания Президиума Совета Министров Республики Беларусь от 04.02.2020 № 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/NSUR-2035-1.pdf>. – Дата доступа: 12.09.2022.
21. Прогноз изменения окружающей природной среды Беларуси на 2010–2020 гг. / под общ. ред. акад. В. Ф. Логинова. – Минск : Минсктипроект, 2004. – 180 с.
22. Стратегия адаптации лесного хозяйства Беларуси к изменению климата до 2050 года : утв. постановлением коллегии Министерства лесного хозяйства Респ. Беларусь от 05.12.2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://climate.ecopartnerstvo.by/ru/library/98>. – Дата доступа: 13.09.2022.
23. Стратегия сохранения и рационального (устойчивого) использования торфяников и Схема распределения торфяников по направлениям использования на период до 2030 года : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 30.12.2015 № 111 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/pravitelstvom-prinjata-strategija-ratsionalnogo-ispolzovaniya-torfjanikov-1804/>. – Дата доступа: 13.09.2022.
24. Схема национальной экологической сети : утв. Указом Президента Респ. Беларусь от 13.03.2018 № 108 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/ob-utverzhdenii-sxemy-natsionalnoj-ekologicheskoj-seti-2250/>. – Дата доступа: 14.09.2022.
25. Схема комплексной территориальной организации Минской области : утв. Указом Президента Респ. Беларусь от 18.01.2016 № 13 [Электронный ресурс] / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Научно-проектное республиканское унитарное предприятие «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА». – Режим доступа: <https://zakonrb.com/npa/ob-utverzhdenii-sxem-kompleksnoy-territorialnoy>. – Дата доступа: 14.09.2022.

#### References

1. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Landshaftno-ekologicheskoe rayonirovanie prigorodnoy territorii Minska* [Landscape and ecological zoning of the suburban area of Minsk]. Materialy XIII Mezhdunarodnoy landshaftnoy konferencii, posvyashchennoy stoletiyu so dnya rozhdeniya F. N. Mil'kova "Sovremennoe landshaftno-ekologicheskoe sostoianie i problemy optimizacii prirodnoy sredy regionov" [Proc. of the XIII Int. Landscape Conf. dedicated to the

- centenary of the birth of F. N. Milkova "Modern landscape-ecological state and problems of optimization of the natural environment of the regions". Voronezh, 2018, pp. 436–438. (in Russian)
2. Struk M. I., Zhivnach S.G. *Bassejnovyj kriterij organizacii prirodnoj karkasa prigorodnoj territorii (na primere Minska)* [Basin criterion for organization of the natural frame of a suburban area (on the example of Minsk)]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 62–72. (in Russian)
3. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Ekologicheskaja ocenka landshaftov prigorodnoj territorii* [Ecological assessment of suburban landscapes]. Gorodskaya sreda: geoekologicheskie aspekty [Urban environment: geoecological aspects]. Minsk, 2013, pp. 271–278. (in Russian)
4. Struk M. I., Zhivnach S. G., Bokaya G. M. *Geoekologicheskaja ocenka prigorodnyh vodohranilishch Minska* [Geoecological assessment of suburban reservoirs of Minsk]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2013, iss. 23, pp. 115–124. (in Russian)
5. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Territorial'naja organizacija zemel' prigorodnoj zony Minska* [Territorial organization of lands in the suburban area of Minsk]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2017, iss. 31, pp. 65–72. (in Russian)
6. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Metodika ekologo-geograficheskogo obosnovaniya organizacii vneshnego prirodного karkasa goroda* [Methods of ecological-geographical substantiation of the organization of the external natural frame of the city]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2016, iss. 3, pp. 86–95. (in Russian)
7. Preobrazhenskij V. S., Aleksandrova T. D., Kupriyanova T. D. *Osnovy landshaftnogo analiza* [Fundamentals of landscape analysis]. Moscow, 1988, 192 p. (in Russian)
8. Vladimirov V. V. *Rasselenie i ekologia* [Settlement and ecology]. Moscow, 1996, 392 p. (in Russian)
9. Pauliukavichus G. B. *Rol' lesa v ekologicheskoy stabilizacii landshaftov* [The role of the forest in the ecological stabilization of landscapes]. Moscow, 1989, 215 p. (in Russian)
10. *Ekonomika sohraneniya bioraznoobrazija. Spravochnik* [Economics of Biodiversity Conservation. Directory] / ed. A. A. Tishkov. Moscow, 2002, 604 p. (in Russian)
11. Gel'tman V. S. *Geograficheskij i tipologicheskij analiz lesnoj rastitel'nosti Belorussii* [Geographical and typological analysis of forest vegetation in Belarus]. Minsk, 1982, 326 p. (in Russian)
12. Reymers N. F. *Prirodopol'zovanie: slovar'-spravochnik* [Nature management: dictionary-reference]. Moscow, 1990, 637 p. (in Russian)
13. Koplan-Diks I. S., Nazarov G. V., Kuznecov V. K. *Rol' mineral'nyh udobrenij v evtrofirovaniu vod sushi* [The role of mineral fertilizers in the eutrophication of land waters]. Leningrad, 1985. 184 p. (in Russian)
14. *Ocenka sostoyaniya zagryaznennosti poverhnostnyh vod v regionah osvoenija neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij i vliyaniya na nih dannogo vida antropogenного vozdejstviya : rekomendacii R 52.24.557-96* [Assessment of the state of pollution of surface waters in the regions of development of oil and gas fields and the impact on them of this type of anthropogenic impact]. Moscow, 1997, 54 p. (in Russian)
15. Morozova O. G. *Faktory evtrofifikacii ekosistemy vodoemov-ohladitelej i principy optimizacii kachestva vody dlya tekhnologicheskikh celej i akvakul'tury* [Factors of eutrophication in the ecosystem of cooling ponds and principles for optimizing water quality for technological purposes and aquaculture]. Krasnoyarsk, 2003, 40 p. (in Russian)
16. Docenko Yu. S. *Evtrofirovanie vodohranilishch, gidrologo-gidrohimicheskie aspekty* [Eutrophication of reservoirs, hydrological and hydrochemical aspects]. Moscow, 2007, 252 p. (in Russian)
17. *O razvitiu gorodov-sputnikov* [About the development of satellite towns]. Available at: <https://president.gov.by/ru/events/aleksandr-lukashenko-7-maja-podpisal-ukaz-214-o-razvitiu-gorodov-sputnikov-8716> (accessed July 25, 2022). (in Russian)
18. *Skhema kompleksnoj territorial'noj organizacii Minskogo rajona* [Scheme of the complex territorial organization of the Minsk region]. Minsk, 2015. (in Russian)
19. *Nacional'naya strategiya ustojchivogo social'no-ekonomiceskogo razvitiya Respubliki Belarus' na period do 2030 goda* [National Strategy for Sustainable Socio-Economic Development of the Republic of Belarus for the period up to 2030]. Available at: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomiceskogo-razvitiya-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf> (accessed September 12, 2022). (in Russian)
20. *Nacional'naya strategiya ustojchivogo razvitiya Respubliki Belarus' na period do 2035 goda* [National Strategy for Sustainable Development of the Republic of Belarus for the period up to 2035]. Available at: <https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/NSUR-2035-1.pdf> (accessed 12 September 2022). (in Russian)
21. *Prognоз izmeneniya okruzhayushchej prirodnoj sredy Belarusi na 2010–2020 gg.* [Forecast of changes in the natural environment of Belarus for 2010–2020]. Minsk, 2004, 180 p. (in Russian)
22. *Strategiya adaptacii lesnogo hozyajstva Belarusi k izmeneniyu klimata do 2050 goda* [Belarus Forestry Adaptation Strategy to Climate Change until 2050]. Available at: <https://climate.ecopartnerstvo.by/ru/library/98> (accessed September 13, 2022). (in Russian)
23. *Strategiya sohraneniya i racionarnogo (ustojchivogo) ispol'zovaniya torfyanikov i Skhema raspredeleniya torfyanikov po napravleniyam ispol'zovaniya na period do 2030 goda* [Strategy for the conservation and rational (sustainable) use of peatlands and the Scheme for the distribution of peatlands by areas of use for the period up to 2030]. Available at: <https://www.minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/pravitelstvom-prinjata-strategija-ratsionalnogo-ispolzovaniya-torfjanikov-1804/> (accessed September 13, 2022) (in Russian). (in Russian)
24. *Skhema nacional'noj ekologicheskoy seti* [Scheme of the national ecological network]. Available at: <https://minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/ob-utverzhdenii-sxemy-natsionalnoj-ekologicheskoy-seti-2250/> (accessed September 14, 2022). (in Russian)

25. *Skhema kompleksnoj territorial'noj organizacii Minskoy oblasti* [Scheme of the complex territorial organization of the Minsk region]. Available at: <https://zakonrb.com/npa/ob-utverzhdenii-shem-kompleksnoy-territorialnoy> (accessed September 14, 2022). (in Russian)

**Информация об авторах**

*Струк Михаил Игоревич* – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Struk-17@mail.ru

*Живнач Светлана Геннадьевна* – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: zhyunach@gmail.com

**Information about the authors**

*Mikhail I. Struk* – Ph. D. (Geography), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Struk-17@mail.ru

*Svetlana G. Zhivnach* – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhyunach@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-2-171-177>

УДК 631.42+362.62

Поступила в редакцию 01.09.2022

Received 01.09.2022

## ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОТИВОЭРОЗИОННОЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ АГРОЛАНДШАФТОВ

В. М. Яцухно<sup>1</sup>, А. Н. Червань<sup>1</sup>, О. В. Тишкович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;

<sup>2</sup>Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки, Беларусь

**Аннотация.** Даны краткая характеристика неблагоприятных последствий проявления водной эрозии почв на территории Беларуси. Предложена интегрированная эколого-экономическая оценка размеров ущерба вследствие водно-эрэзионных процессов в агроландшафтах республики. Приведен расчет ущерба в стоимостном выражении по данным II тура кадастровой оценки земель на примере пахотных земель РУП «Учхоз БГСХА» Горецкого района Могилёвской области.

Определены варианты оптимизации противоэрэзионной структуры возделываемых сельскохозяйственных культур на основе эколого-экономической оценки и агроэкологической группировки рабочих участков по величине вероятного ущерба вследствие эрозии, в том числе упущенныи выгоды производства сельскохозяйственной продукции.

**Ключевые слова:** водная эрозия почв; агроландшафт; эколого-экономическая оценка; территориальная организация.

**Для цитирования.** Яцухно В. М., Червань А. Н., Тишкович О. В. Эколо-экономическое обоснование противоэрэзионной территориальной организации агроландшафтов // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 171–177.

## ECOLOGICAL AND ECONOMIC GROUND OF THE ANTI-EROSION TERRITORIAL ORGANIZATION OF AGRICULTURAL LANDSCAPES

V. M. Yatsukhno<sup>1</sup>, A. N. Chervan<sup>1</sup>, O. V. Tishkovich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus;

<sup>2</sup>Belarusian State Agricultural Academy, Gorki, Belarus

**Abstract.** A brief description of the adverse consequences of the manifestation of water erosion of soils on the territory of Belarus is given. An integrated ecological and economic assessment of the extent of damage due to water erosion processes in the agricultural landscapes of the republic is proposed. The calculation of damage in value terms according to the data of the second round of the cadastral valuation of land is given on the example of arable lands of the Republican unitary enterprise "Uchkhоз BGSHA" of the Goretsky district of the Mogilev region.

The options for optimizing the anti-erosion structure of cultivated crops are determined on the basis of an ecological and economic assessment and agro-ecological grouping of working areas according to the magnitude of probable damage due to erosion, including lost profits from agricultural production.

**Keywords:** soils water erosion; agrolandscapes; ecological and economic assessment; territorial organization.

**For citation.** Yatsukhno V. M., Chervan A. N., Tishkovich O. V. Ecological and economic ground of the anti-erosion territorial organization of agricultural landscapes. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 171–177.

**Введение.** Среди современных глобальных и региональных угроз, негативно влияющих на экологическое состояние и функционирование наземных и водных экосистем, заметно снижающих продуктивность возделываемых сельскохозяйственных культур и тем самым выступающих в качестве сдерживающего фактора обеспечения продовольственной безопасности, является проявление деградационных процессов земель [1, 2]. Среди последних ключевая роль в Республике Беларусь принадлежит водной эрозии почв сельскохозяйственных земель, в структуре которых доля эрозионно опасных разновидностей составляет 45 %. Из них 473,3 тыс. га подвержено водной эрозии, в том числе на пахотных землях – 361,7 тыс. га. По данным многолетних полевых опытов Института почвоведения и аг-

рохимии НАН Беларуси, даже при условиях соблюдения научно обоснованных технологических регламентов возделывания основных сельскохозяйственных культур на склоновых землях ( $2^{\circ} \dots 7^{\circ}$ ) с разной степенью проявления водной эрозии почв, их продукционная способность уменьшается от 10 до 40 % и она ниже, чем неэродированных. Недоборы урожаев вследствие процессов эрозионной деградации на дерново-подзолистых почвах на лёссовидных и лёссовых суглинках составляет 6–35 %, на моренных суглинках – 3–29 % в зависимости от возделываемой сельскохозяйственной культуры. При этом средневзвешенный размер поверхностного смыва достигает 10,7 т/га, а ежегодные потери гумусовых веществ составляют 180,0 кг/га, азота – 8–10, фосфора и калия – 5–6 кг/га [3].

Наряду со снижением производительных функций почв в результате проявления водно-эроздионных процессов наблюдается нарушение и их экологических функций (буферных, сорбционных, водно-тепловых, биогеохимических, газорегулирующих, эдафических и др.), что заметно снижает ценность таких почв с позиций предоставления ими экосистемных услуг [4, 5]. В связи с этим весьма актуальной и практически востребованной является проблема защиты почв от деградации в результате проявления водной эрозии. Успешное ее решение возможно только при сочетании различных агротехнологических почвозащитных приемов обработки склоновых земель и ухода за сельскохозяйственными культурами с мероприятиями территориально-организационного характера [6]. Последние базируются на данных установления эрозионно допустимого смыва почв, оценке почвозащитной роли сельскохозяйственных культур и севооборотов, а также нормативов формирования и территориальной привязки элементов противоэроздионного устройства агроландшафтов.

Учитывая долговременную роль, которую выполняет противоэроздионная территориальная организация агроландшафтов, ее научное обоснование нуждается в результатах эколого-экономической оценки эродированных почв, отражающей размер ущерба (вреда) за счет не только потерь их биопродуктивности, но и ухудшения их плодородия через потери питательных веществ с позиций предоставления ими экосистемных (обеспечивающих) услуг, выполняемых такими почвами.

**Объекты и методика исследования.** Объектами исследования послужили почвы и почвенный покров аграрного землепользования РУП «Учхоз БГСХА» Горецкого района Могилёвской области площадью 12,4 тыс. га, из которых пахотные и улучшенные луговые земли занимают 10,1 тыс. га. Почвенный покров полигона исследований отличается наиболее эрозионно опасным гранулометрическим составом – лёссовидными суглинками, что на фоне достаточно расчлененного рельефа создает условия для активного проявления процессов водной эрозии почв. В качестве первичной территориальной единицы для эколого-экономической оценки эродированных почв (включая группировку почв по интенсивности смыва, определение их пригодности), а также размеров нанесенного ущерба, организации севооборотов и установления структуры посевов, использовали рабочий участок, в границах которого возделывается одна сельскохозяйственная культура по установленной технологии [7]. Указанную оценку применяли к 287 таким участкам, размер которых колебался от 0,1 до 329,2 га. Интегрированную эколого-экономическую оценку размеров ущерба от водной эрозии почв, выраженного в стоимостной форме, определяли по результатам потерь нормативного чистого дохода при производстве растениеводческой продукции [8] и снижения плодородия почв путем определения уменьшения содержания в них фосфора, калия, гумуса. Для установления их показателей использовали зависимость

$$Y_{\text{п.в.}} = \Delta \text{ПВС},$$

где,  $Y_{\text{п.в.}}$  – размер ущерба за счет снижения питательных веществ в эродированных почвах, долл. США/га;  $\Delta \text{ПВ}$  – снижение содержания питательных веществ в пахотном слое почв 0–20 см, т/га; С – стоимость потерь питательных веществ в почвах в результате эрозионного смыва, долл. США/га.

Для установления размера стоимости потерь питательных веществ использовали аналоги стоимости соответствующих минеральных и органических удобрений в республике на 01.01.2022. Для выполнения группировки отдельно обрабатываемых рабочих участков пахотных и улучшенных земель по степени их пригодности к возделыванию сельскохозяйственных культур, отражения территориальной дифференциации размеров ущерба, наносимого в результате проявления водной эрозии, а также формирования противоэроздионной структуры посевых площадей и севооборотов, применяли расчетно-аналитический, сравнительно-аналитический и картографический методы исследований.

**Результаты и их обсуждение.** До настоящего времени остается слабо разработанным экономический механизм борьбы с деградацией земель и охраны почвенно-земельных ресурсов. Это связано с отсутствием адекватных методических подходов при проведении эколого-экономической (стоимостной) их оценки. Существующее положение во многом затрудняет определение возмещения вреда, приносимого почвенно-земельным ресурсам, установление платежей за землепользование и размеров экологического страхования, устранение недостаточного развития механизмов стимулирования борьбы с деградацией земель и другое, что в целом сдерживает эффективное использование, охрану земель/

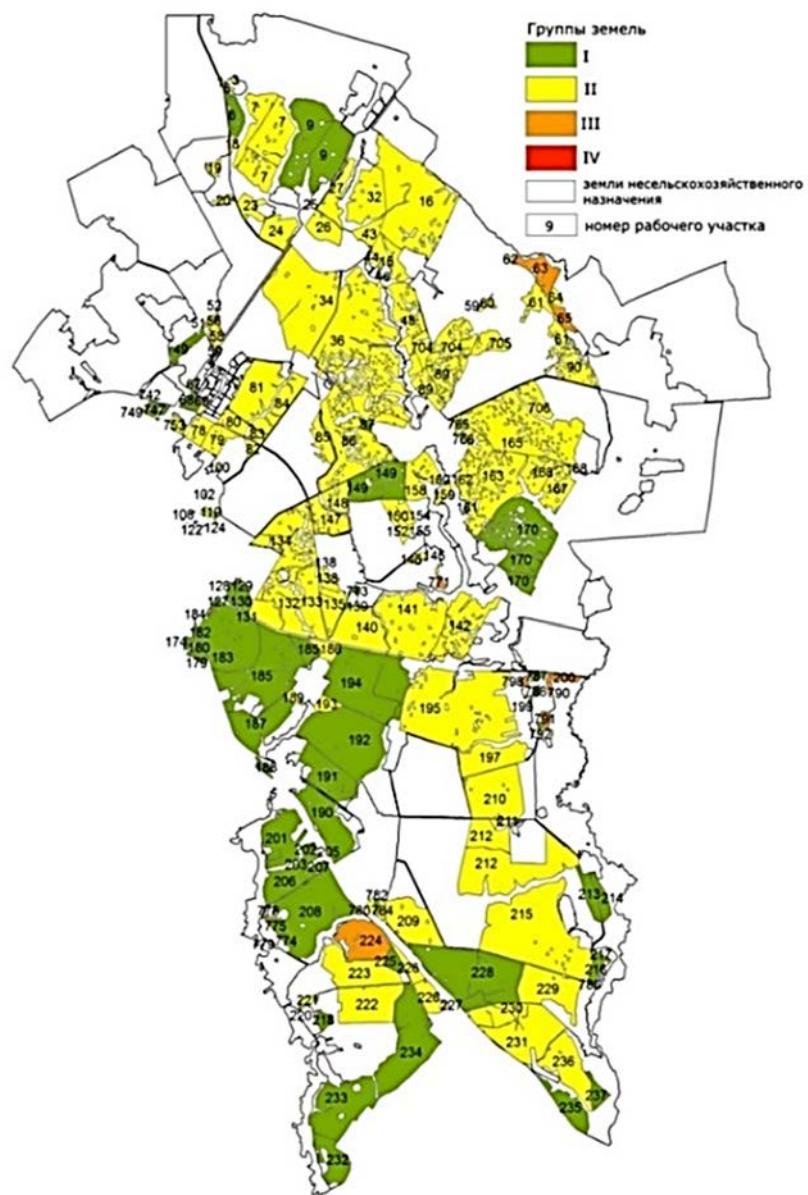
почв и мотивацию (стимулирование) побуждающих их осуществлять. Для исправления такой ситуации в недавно принятой Доктрине национальной продовольственной безопасности до 2030 года к числу важных и безотлагательных задач относятся «...своевременное выявление, оценка, прогнозирование и упреждение внутренних и внешних угроз продовольственной безопасности, минимизация их негативного влияния» [9, с. 4]. Учитывая то обстоятельство, что водная эрозия почв – наиболее действенный фактор таких угроз, оценка ущерба от ее проявления должна базироваться и учитывать выполнение почвами дуалистической роли. С одной стороны, они являются экономико-хозяйственной категорией, продукцирующей определенную биомассу сельскохозяйственных культур, а с другой – относятся к ключевому компоненту природной среды, выполняющему экологические функции и предоставляющему экосистемные услуги, которые содействуют и дополняют их экономическую ценность [10]. Этим подчеркивается значимость почв как важного и незаменимого эколого-экономического актива, необходимость которого следует учитывать при принятии управлений решений и осуществлении устойчивого землепользования, в том числе при планировании и проектировании последнего, включая вопросы территориальной организации агроландшафтов. Практическая значимость результатов эколого-экономической оценки почв, в разной степени подверженных водной эрозии, особенно востребована на уровне сельскохозяйственной организации при проведении внутрихозяйственного землеустройства. Она направлена на решение задач по организации и устройству территории агроландшафта, включая оптимизацию использования почвенно-земельных ресурсов и их охраны, а также структуры посевных площадей и чередования сельскохозяйственных культур во времени и пространстве с целью их максимальной адаптированности к местным природно-экономическим условиям [11]. Более подробно рассмотрим эти вопросы на примере аграрного землепользования РУП «Учхоз БГСХА» Горецкого района Могилёвской области, отличительной особенностью которого является высокая степень распаханности земель (77,3 %), преобладание в структуре посевных площадей зерновых, зернобобовых и пропашных культур – 79,2 %, возделываемых на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах, развивающихся на покровных лёссовидных суглинках, отличающихся низкой противоэрозионной устойчивостью [2]. В связи с тем, что аграрное землепользование в основном сконцентрировано на бугристо-западинном рельефе с уклонами от 2° до 7°, общая площадь разной степени эродированных почв составила 4 140,1 тыс. га, или 42,1 %, из них слабоэродированных – 3 549,0, среднеэродированных – 566,1, сильноэродированных – 25,1 га.

Для расчета ущерба, нанесенного водной эрозией почв в стоимостном выражении использованы результаты II тура кадастровой оценки земель, завершенного в 2016 г. [12], в частности показатели нормативного чистого дохода по каждой из 18 видов сельскохозяйственной культуры, возделываемых в регионе. Его расчет включал определение нормативной урожайности культур на каждом рабочем участке (ц/га), определение цены единицы продукции культуры (долл. США/ц), нахождение величины себестоимости – нормативные затраты в расчете на единицу продукции культуры (долл. США/ц). Помощью использования поправочных коэффициентов к баллу почв, учитывающих влияние степени их эродированности, установлен размер уменьшения нормативного чистого дохода растениеводческой продукции на 1 га, а также для каждого рабочего участка и в целом для пахотных и улучшенных луговых земель хозяйства. Так, потери нормативного чистого дохода на эродированных почвах под зерновыми и зернобобовыми культурами составили в среднем 50,5 долл. США/год, пропашные – 200,4, многолетних злаковых и бобовых трав и бобово-злаковых травосмесей – 13,6 долл. США/год.

Исходя из сложившейся в РУП «Учхоз БГСХА» Горецкого района Могилёвской области структуры посевных площадей, в которой зерновые и зернобобовые культуры занимают 73,5 %, пропашные – 4,1 и многолетние травы – 20,8 %, установлено, что потери нормативного чистого дохода на пахотных и улучшенных луговых землях, почвы которых подвержены разной степени водной эрозии, составляют 320,8 тыс. долл. США/год при общем получаемом чистом доходе при возделывании растениеводческой продукции 1,45 млн долл. США/год.

Для расчета эколого-экономических издержек в результате негативных последствий проявления водной эрозии почв на пахотных и улучшенных луговых землях предлагается использовать показатель упущененной выгоды, который включает в себя, наряду со стоимостью недобора растениеводческой продукции, также и стоимость потерь гумусовых веществ и питательных элементов в почве (в данном случае  $P_2O_5$  и  $K_2O$ ). Для этого нами предлагается упущенную выгоду определять как отношение суммы произведенений цен реализации продукции растениеводства к снижению урожайности и отношение снижения содержания питательных веществ в эродированных почвах к их стоимости. По результатам проведенных полевых опытов при существующей структуре севооборотов ежегодные потери органического вещества в разной степени эродированных почвах колеблются от 1,3 до 4,7 т/га,  $K_2O$  – от 43,6 до 48,3,  $P_2O_5$  – от 56,4 до 95,8 кг/га. На основании полученных опытных данных определены запасы гумуса и элементов питания растений по каждому рабочему участку хозяйства с учетом эродированных площадей. Сопоставлены запасы данных элементов для эродированных почв с показателями на неэродированных почвах и определены их потери. Для данного хозяйства стоимость потерь гумусовых веществ и элементов питания растений составляет 290,1 тыс. долл. США/год, при общей стоимости запасов содержащихся в почве органического вещества и подвижных соединений фосфора и калия более 9,1 млн долл. США/год в целом по хозяйству, что свидетельствует о значительном негативном влиянии водной эрозии почв на растениеводческую отрасль хозяйства.

С целью разработки территориально-организационных мероприятий по снижению наносимого ущерба в результате проявления почвенно-эрзационных процессов предлагается все рабочие участки аграрного землепользования с различным соотношением почв разной степени эродированности объединить в четыре группы (рис. 1). Для каждой из выделенных групп предложена наиболее рациональная структура посевных площадей с использованием вариантного способа и метода сравнения с целью выбора оптимального сочетания сельскохозяйственных культур, при котором наблюдаются минимальные потери величины нормативного чистого дохода растениеводческой продукции и обеспечивается снижение потерь питательных веществ из почв в результате эрозии при возделывании сельскохозяйственных культур (см. таблицу). Практическое осуществление предлагаемого мероприятия позволит увеличить нормативный чистый доход с 179,1 до 221,8 долл. США с 1 га пахотных и улучшенных луговых земель и одновременно снизить потери питательных веществ на 38,2 долл. США/га.



**Рис. 1. Группировка рабочих участков РУП «Учхоз БГСХА» пахотных земель по интенсивности проявления на них водной эрозии почв**

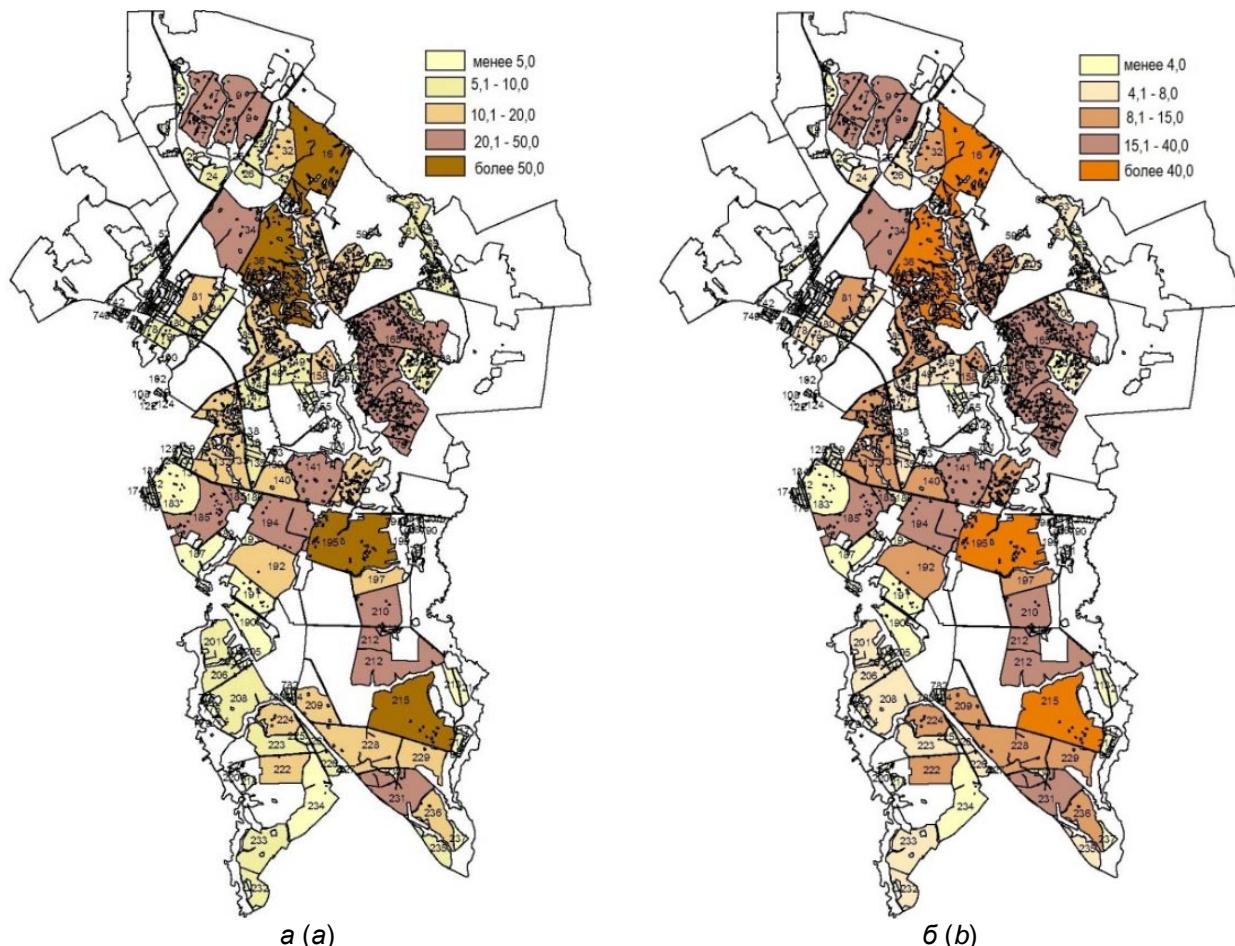
**Fig. 1. Grouping of working plots of RUE "Uchkhоз BGSHA" of arable lands according to the intensity of water erosion of soils**

**Результаты эколого-экономической (стоимостной) оценки ущерба, наносимого водной эрозией почв пахотных земель РУП «Учхоз БГСХА» Горецкого района Могилёвской области при существующей (А) и предлагаемой (Б) противоэрозионной структуре возделываемых сельскохозяйственных культур**

**Results of ecological and economic (cost) assessment of damage caused by water erosion of soils arable lands RUE "Uchkhоз BGSHA" Goretsky district of Mogilev region with the existing (A) and proposed (B) anti-erosion structure of cultivated crops**

Группа земель	Тип севооборота	Соотношение сельскохозяйственных культур			Уменьшение размера нормативного чистого дохода растениеводческой продукции, долл. США/га	Стоимость потерь питательных веществ почв, долл. США/га
		Зерновые и зерново-бобовые	Пропашные	Многолетние травы		
	A	73,5	5,7	20,8	77,3	70,7
I	Б	Зернопропашной	50,0	20,1	29,9	67,0
II		Плодосменный	62,5	12,5	25,0	58,3
II	Б	Зернотравный	50,0	—	50,0	31,9
IV		Травяно-зерновой	20,0	—	80,0	22,2
					20,3	10,4

Указанный подход в части более полного обоснования дополняет имеющиеся научные и проектные разработки в области почвозащитных мероприятий и рационального использования сельскохозяйственных земель в агроландшафтах Беларуси [13, 14].



**Рис. 2. Группировка рабочих участков по величине ущерба, наносимого водной эрозией почв при существующей (а) и предлагаемой (б) структуре посевных площадей, долл. США/га**

**Grouping of working plots according to the amount of damage caused by water erosion of soils with the existing (a) and proposed (b) structure of crop areas, USD/ha**

Одно из перспективных и востребованных направлений интеграции результатов эколого-экономической оценки эродированных почв – составление картограмм в рамках рабочих схем внутрихозяйственного землеустройства, иллюстрирующих сопоставление размеров нанесенного ущерба в стоимостном выражении при существующей и предлагаемой противоэррозионной структуре посевных площадей (рис. 2). Подобные картограммы, сопровождающиеся развернутыми пояснительными записками, позволяют более обоснованно определять критический уровень рентабельности и условия возделывания сельскохозяйственных культур с разработкой технологических карт и формированием севооборотов, а также целесообразность применения мелиоративных и культуртехнических противоэррозионных мероприятий.

**Заключение.** Типология земель, предполагающая выделение территорий, единых по природным условиям сельскохозяйственного производства и соизмеримых с единицами хозяйственного использования, определяет конкретное направление их хозяйственного использования и создает необходимые предпосылки для формирования рабочих участков. Рассмотренная эколого-экономическая оценка величины ущерба в зависимости от степени проявления процессов водной эрозии и соответствующая группировка рабочих участков позволяют дополнить существующие технологии адаптивно-ландшафтного земледелия в части интеграции земельно-кадастровых данных, почвенных условий и экономических рисков землепользования в эрозионно опасных агроландшахтах.

*Статья подготовлена по материалам научного задания 1.05.6, выполняемого в рамках подпрограммы «Природные ресурсы и их рациональное использование» Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы.*

#### Список использованных источников

1. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070) / P. Borelli [et. al.] // Environmental Sciences. – 2020. – Vol. 117, № 36. – P. 2194–2201.
2. Почвы Республики Беларусь / под ред. В. В. Лапы. – Минск : ИВЦ Минфина, 2019. – 632 с.
3. Черныш, А. Ф. Новые подходы к количественной оценке эрозионной деградации почв / А. Ф. Черныш, В. Т. Сергеенко, А. Г. Кондаурова // Почтоведение и агрохимия. – 2012. – № 1 (48). – С. 7–17.
4. О включении экосистемных услуг в систему оценки ущерба от деградации земель / Е. В. Цветнов [и др.] // Почтоведение. – 2016. – № 12. – С. 1534–1540.
5. Яцухно, В. М. От изучения свойств почв и функций земель и почв к оценке их экосистемных услуг: обзор / В. М. Яцухно, Е. В. Цветнов // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2019. – № 2. – С. 3–14.
6. Методические указания по проектированию почвозащитной системы земледелия с контурно-мелиоративной организацией территории в разных ландшафтных зонах Республики Беларусь. – Минск : БГУ, 1997. – 44 с.
7. Словарь-справочник землеустроителя / под ред. А. С. Помелова. – Минск, 2014. – 271 с.
8. Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель сельскохозяйственных организаций и крестьянских (фермерских) хозяйств. Содержание и технология работ : ТКП 302-2011(03150). – Введ. 01.05.2011. – Минск : Госкомимущество, 2011. – 137 с.
9. Доктрина национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь до 2030 года : утв. Постановлением Совета Министров Респ. Беларусь, 15.12.2017, № 962 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 22.12.2017. – № 5/44566.
10. Макаров, О. А. Экономическая оценка почв: существующий опыт и перспективы научного направления / О. А. Макаров, А. Н. Яковлев, Е. В. Цветнов // АПК: экономика и управление. – 2017. – № 7. – С. 58–67.
11. The contribution of integration land use planning and integrated landscape management to implementing land degradation neutrality: entry points and support tools // UNCCD-SPI. Technical series. – Bonn (Germany), 2022. – №. 6 – 143 р.
12. Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель сельскохозяйственных организаций и крестьянских (фермерских) хозяйств: методика, технология, практика / Г. М. Мороз [и др.]. – Минск : ИВЦ Минфина, 2017. – 208 с.
13. Проектирование противоэррозионных комплексов и использование эрозионных земель в разных ландшафтных зонах Беларуси: рекомендации / под ред. А.Ф. Черныша ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т почтоведения и агрохимии. – Минск, 2005. – 52 с.
14. Червань, А. Н. Картографическое обеспечение управляемого адаптивно-ландшафтного земледелия в агроландшахтах Беларуси / А. Н. Червань // Агрофизика. – 2022. – № 1. – С. 21–29. doi:10.25695/AGRPH.2022.01.04

#### References

1. Borelli P. [et. al.]. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *Environmental Sciences*, 2020, vol. 117, no. 36, pp. 2194–2201.
2. *Pochvy Respubliki Belarus'* [Soils of Republic of Belarus]. Ed. by V. V. Lapa. Minsk, 2019, 632 p. (in Russian)

3. Chernysh A. F., Sergeenko V. T., Kondaurova A. G. *Novye podkhody k kolichestvennoy osenke erozionnoy degradacii pochv* [New Approaches to Quantifying Erosive Soil Degradation]. *Soil Science and Agrochemistry*, 2012, no. 1 (48), pp. 7–17. (in Russian)
4. Cvetnov E. V., Makarov O. V., Yakovlev A. S., Bondarenko E. V. *O vkluchenii ekosistemnykh uslug v sistemу ocenki uscherba ot degradacii zemel'* [On the inclusion of ecosystem services in the system for assessing damage from land degradation]. *Soil Science*, 2016, no. 12, pp. 1534–1540. (in Russian)
5. Yatsukhno V. M., Scvetnov E. V. *Ot izucheniya svoystv pochv i funkciy zemel' i pochv k ocenke ikh ekosistemnykh uslug: obzor* [From studying soil properties and land and soil functions to assessing their ecosystem services: an overview]. *Journal of the Belarusian State University. Geography. Geology*, 2019, no. 2, pp. 3–14. (in Russian)
6. *Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu pochvozashchitnyi sistemy zemledeliya s kontorno-meliorativnoy organizaciy territoriy v raznykh landscapezhnykh zonakh Respubliki Belarus'* [Guidelines for the design of a soil-protective system of agriculture with contour-reclamation organization of the territory in different landscape zones of the Republic of Belarus]. Minsk, BSU Publ., 1997, 44 p. (in Russian)
7. *Slovar'-spravochnik zemleustroityelya* [Land Surveyor Dictionary]. Ed. by A. S. Pomelev. Minsk, 2014, 271 p. (in Russian)
8. *Kadastrovaya osenka sel'skokhozyastvennykh zemel' sel'skokhozyastvennykh organizaciy i krest'yanskikh (fermerskikh) khozyastv. Soderzhanie i tekhnologiya rabot.* TKP 302-2011(03150). Vved. 01.05.2011 [Cadastral valuation of agricultural lands of agricultural organizations and peasant (farmer) households. Content and technology of works. Introduced 05/01/2011]. Minsk, Committee of Property, 2011, 137 p. (in Russian)
9. *Doktrina nacionaльnoy prodovol'stvennoy bezopasnosti Respubliki Belarus' do 2030 goda : utv. Postanovleniem Soveta Ministrov Resp. Belarus ot 15.12.2017 № 962* [Doctrine of National Food Security of the Republic of Belarus until 2030 : approved by the Resolution of the Council of Ministers of Rep. Belarus, dated 12/15/2017, no. 962]. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*, 22.12.2017, 5/44566. (in Russian)
10. Makarov O. A., Yakovlev A. N., Scvetnov E. V. *Ekonomiceskaya osenka pochv: sushestvuyushchiy opyt i perspektivi nauchnogo napravleniya* [Economic evaluation of soils: existing experience and prospects of the scientific direction]. APK: economy and regulation, 2017, no. 7, pp. 58–67. (in Russian)
11. The contribution of integration land use planning and integrated landscape management to implementing land degradation neutrality: entry points and support tools, *UNCCD-SPI. Technical series*, Bonn (Germany), 2022, no. 6, 143 p.
12. Moroz G. M. [et al.]. *Kadastrovaya osenka sel'skokhozyastvennykh zemel' sel'skokhozyastvennykh organizaciy i krest'yanskikh (fermerskikh) khozyastv: metodika, tekhnologiya, praktika* [Cadastral valuation of agricultural land of agricultural organizations and peasant (farmer) households: methodology, technology, practice]. Minsk, 2017, 208 p. (in Russian)
13. *Proektirovanie protivoerozionnykh kompleksov i ispolzovanie erozionnykh zemel' v raznykh landscapezhnykh zonakh Belarusi : rekomendacii* [Design of anti-erosion complexes and use of erosive lands in different landscape zones of Belarus: recommendations]. Ed. by A. F. Chernysh, National Academy of Sciences of Belarus, Institute for Soil Science and Agrochemistry, Minsk, 2005, 52 p. (in Russian)
14. Chervan A. N. *Kartographicheskoe obespechenie upravlyayemogo adaptivno-landscapechnogo zemledeliya v agrolandscapeakh Belarusi* [Cartographic support of managed adaptive-landscape agriculture in agrolandscapes of Belarus]. *Agrophysic*, 2022, no. 1, pp. 21–29. doi:10.25695/AGRPH.2022.01.04 (in Russian)

### Информация об авторах

**Яцухно Валентин Минович** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: yatsukhno@bsu.by

**Червань Александр Николаевич** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой почвоведения и ГИС, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: chervan@bsu.by

**Тишкович Олеся Владимировна** – старший преподаватель, Белорусская государственная сельскохозяйственная академия (ул. Мичурина, 5, 213410, г. Горки, Беларусь). E-mail: yatsukhno@bsu.by

### Information about the authors

**Valentin M. Yatsukhno** – Ph. D. (Agriculture), Assoc. Prof., Leading Researcher, Belarussian State University (Nezavisimosti Av., 4, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: yatsukhno@bsu.by

**Aleksander N. Chervan** – Ph. D. (Agriculture), Assoc. Prof., Head of department of soil science and GIS, Belarussian State University (Nezavisimosti Av., 4, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: chervan@bsu.by

**Olesya V. Tishkovich** – Senior Teacher, Belarussian State Agricultural Academy (Michurina Str., 5, 213410, Gorky, Belarus). E-mail: ms.tishkovich@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ВЛАГОУСТОЙЧИВОСТЬ И ПЕРЕХОД ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ В ВОДНЫЙ РАСТВОР ИЗ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Н. Е. Сосновская, В. А. Ракович, О. Г. Красноберская

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

**Аннотация.** Изучено влияние стабилизирующих добавок на водоустойчивость гранулированных органоминеральных удобрений с высоким содержанием калия. Показано, что применение стабилизирующих добавок  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  и  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  в количестве 2,5–5,0 % и при температуре сушки 120 °C позволяет обеспечить водоустойчивость гранул до 90 %, повышает переход гуминовых веществ в биологически активную водорастворимую форму и снижает загрязнение окружающей среды элементами питания растений. Эти добавки содержат в своем составе компоненты питательных веществ для роста и развития растений и не приводят к возможному загрязнению почв по сравнению с широко используемыми для этих целей полимерными материалами.

**Ключевые слова:** гранулированные органоминеральные удобрения; стабилизирующие добавки; водоустойчивость гранулы; гуминовые вещества.

**Для цитирования.** Сосновская Н. Е., Ракович В. А., Красноберская О. Г. Влияние стабилизирующих добавок на влагоустойчивость и переход гуминовых веществ в водный раствор из гранулированных органоминеральных удобрений // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 178–184.

## THE EFFECT OF STABILIZING ADDITIVES ON THE WATER RESISTANCE AND TRANSITION HUMIC SUBSTANCES IN WATER SOLUTION FROM GRANULATED ORGANOMINERAL FERTILIZERS

N. E. Sosnovskaya, V. A. Rakovich, O. G. Krasnoberskaya

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**Abstract.** The effect of stabilizing additives on the water resistance of granular organomineral fertilizers with a high potassium content has been studied. It is shown that the use of stabilizing additives  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  and  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  in an amount of 2.5–5.0 % and a drying temperature of 120 °C makes it possible to ensure the water resistance of granules up to 90 %, increases the transition of humic substances into a biologically active water-soluble form and reduces environmental pollution by plant nutrients. These additives contain components of nutrients for plant growth and development in their composition and do not lead to possible contamination of soils in comparison with polymer materials widely used for these purposes.

**Keywords:** granular organomineral fertilizers; stabilizing additives; water resistance of granules; humic substances.

**For citation.** Sosnovskaya N. E., Rakovich V. A., Krasnoberskaya O. G. The effect of stabilizing additives on the water resistance and transition humic substances in water solution from granulated organomineral fertilizers. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 178–184.

**Введение.** Удобрения контролируемого и пролонгированного действия – это удобрения, содержащие элементы питания в форме, которая позволяет отсрочить их высвобождение и поглощение растением после внесения или которая удлиняет срок их доступности для растений по сравнению с быстroredействующими удобрениями (такими как аммиачная селитра, карбамид и др.). Такого эффекта достигают разными путями, среди которых контроль растворимости в воде с помощью полупроницаемого покрытия (капсулы), медленнорастворимые соединения, использование ингибиторов нитрификации и уреазы.

Несмотря на широкий спектр приемов, обеспечивающих пролонгированное действие удобрения, все они наиболее применимы к азотсодержащим или комплексным удобрениям. Однако существует потребность в однокомпонентных калийных удобрениях для определенных стадий развития сельскохозяйственных культур.

Хлористый калий является одним из основных широко распространенных минеральных удобрений. В растениях ионы калия находятся в вакуолях и цитоплазме, и их роль в жизни растений многогранна [1, 2]: они стабилизируют структуру хлоропластов и митохондрий, способствуют формированию богатой энергией аденоинтрифосфорной кислоты, повышают гидратацию коллоидов цитоплазмы и степень их дисперсности, поэтому растения лучшедерживают воду и переносят засухи. Калий способствует образованию сахаров, повышает осмотическое давление в клетках и тем самым увеличивает холодаустойчивость растений, а также их способность противостоять бактериальным и грибным болезням. Калий усиливает синтез целлюлозы, гемицеллюлоз, пектинов и других высокомолекулярных углеводов, укрепляющих клеточные стены соломин, благодаря чему повышается устойчивость растений к полеганию, улучшается качество волокна льна. Под влиянием калия усиливается накопление крахмала в клубнях картофеля, сахарозы – в сахарной свекле, моносахаридов – в плодовых и овощных культурах. Без калийных удобрений невозможно было бы современное высокопродуктивное земледелие.

Вместе с тем существенным недостатком хлористого калия как удобрения является его высокая растворимость в воде, поэтому он вымывается из пахотного слоя атмосферными осадками, особенно на песчаных и супесчаных почвах. В 2010–2018 гг. в Беларуси ежегодно вносили в пересчете на 100%-ное питательное вещество ( $K_2O$ ) 358–623 тыс. т [3], а потери составляли 25–35 % от внесенного количества в зависимости от свойств почв. Вынесенные из пахотного слоя почвы вертикальными и горизонтальными водными потоками ионы калия и хлора попадают в водоемы и водотоки, ухудшая состояние окружающей среды, например, в р. Припять и ее притоках после проведения мелиорации земель в Полесье в результате применения быстрорасторимых удобрений содержание хлора, калия и азота увеличилось от 3 до 40 раз [4]. Последствия вымывания быстрорасторимых удобрений из почвы атмосферными осадками обременительны для экономики и губительны для окружающей среды Беларуси.

Для уменьшения вымывания из почвы атмосферными осадками быстрорасторимых минеральных удобрений предложено их применять в гранулированных органоминеральных формах [5–7], причем в качестве органического связующего рекомендуется использование торфа, сапропеля, бурого угля. Коэффициент усвоения растениями питательных веществ из гранулированных органоминеральных удобрений в 1,5 раза выше, чем из стандартных минеральных [5, 7]. Другим преимуществом органоминеральных удобрений на основе торфа является переход части гуминовых веществ в биологически активную водорастворимую форму в виде гуматов калия [5, 8, 9]. Несмотря на многие десятки лет использования органоминеральных удобрений на основе торфа, до сих пор остается неясным вопрос о взаимодействии гуминовых веществ торфа с хлористым калием в технологических процессах производства гранулированных органоминеральных удобрений.

Цель работы – исследовать взаимодействие органического вещества торфа с хлористым калием в составе гранулированных органоминеральных удобрений для обоснования составов и технологии получения новых видов органоминеральных удобрений, обеспечивающих экономию питательных веществ за счет уменьшения их вымывания и охрану окружающей среды.

**Материалы и методы исследований.** Для исследования использовали тростниковый торф низинного типа из торфяного месторождения Гало-Ковалевское. Фрезерный торф имел степень разложения 30–35 %, зольность 9,5 %, влажность 52 %, в качестве источника калия был выбран хлористый калий  $KCl$ , содержание которого составляло 25 и 50 % на сухое вещество торфа. Предварительные опыты по смешению и грануляции таких смесей показали, что полученные гранулы не обладают водоустойчивостью и распадаются в водной среде через 24 ч наблюдения. В качестве стабилизирующих добавок для увеличения водоустойчивости и прочности гранул использовали карбонат аммония  $(NH_4)_2CO_3$  и фосфат кальция  $Ca_3(PO_4)_2$  в количестве 1,0; 2,5; 5,0 и 7,5 %, поскольку эти соединения содержат в своем составе компоненты питательных веществ для роста и развития растений и не приводят к возможному загрязнению почв по сравнению с широко используемыми для этих целей полимерными материалами. Смеси тщательно перемешали и подвергли трех-пятикратной грануляции для придания им пластичных свойств. Затем приготовленные гранулы разделили на четыре образца, которые высушили до постоянного веса в термостатируемом шкафу при 20 °C, 90 °C, 110 °C и 120 °C.

Для оценки эффективности пролонгированного действия органоминеральных удобрений из полученных гранул приготовили серию растворов, моделирующих вымывание водорастворимых веществ в естественных условиях. В фильтратах определили pH и оптическую плотность (D440, D660), а также оценили водоустойчивость гранул по соотношению массы оставшихся целых гранул в конце эксперимента к их исходной массе. Общее время эксперимента составило 360 ч.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты исследований показали (табл. 1), что при содержании в гранулах  $KCl$  25 % оптическая плотность водных экстрактов за первые 24 ч настаивания увеличивается с ростом концентрации стабилизирующей добавки  $(NH_4)_2CO_3$  для всех температур сушки. Введение в состав гранул ионов  $NH_4^+$  в нарастающей концентрации приводит к увеличению доли образования водорастворимых гуматов аммония и, как следствие, к повышению их концентрации в растворе, о чем свидетельствуют рост оптической плотности водных растворов при 440 нм и увеличение

pH с 6,5 до 7,5. Возрастание температуры сушки приводит к разложению карбоната аммония с образованием аммиака, его связыванию гуминовыми веществами торфа с образованием водорастворимых гуматов аммония, и оптическая плотность также увеличивается при одинаковой концентрации стабилизирующей добавки. Через 192 ч экспозиции оптическая плотность водных экстрактов гранул, полученных при температуре 20 °C, несколько снижается по сравнению с первыми экстрактами, но с увеличением температуры сушки до 110 °C возрастает. Наблюдается также повышение pH водных экстрактов с 7,4 до 8,1.

**Таблица 1. Влияние содержания добавки  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  на величину оптической плотности, pH водных экстрактов и водоустойчивость гранул с содержанием 25 % KCl при разных температурах сушки**

**Table 1. The effect of the content of the additive  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  on the optical density, pH of water extracts and water resistance of granules with a content of 25 % KCl at different drying temperatures**

$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ , %	Темпера-тура сушки, °C	Водоустой-чивость гранул, %	рН			D (440 нм)			D (660 нм)		
			24 ч	192 ч	360 ч	24 ч	192 ч	360 ч	24 ч	192 ч	360 ч
1,0	20	10	6,61	7,41	7,51	0,215	0,114	0,305	0,011	0,012	0,043
	110	10	6,48	7,65	7,62	0,227	0,236	0,340	0,022	0,029	0,049
2,5	20	10	7,12	7,77	7,71	0,228	0,171	0,320	0,015	0,020	0,047
	90	50	6,94	7,91	7,80	0,236	0,247	0,339	0,025	0,030	0,048
	110	70	6,87	7,90	7,75	0,287	0,292	0,337	0,032	0,037	0,048
5,0	20	10	7,51	8,01	7,85	0,300	0,175	0,309	0,014	0,019	0,042
	90	70	7,35	8,07	7,82	0,307	0,275	0,322	0,028	0,033	0,044
	110	70	7,21	8,10	7,85	0,366	0,284	0,323	0,031	0,036	0,045
7,5	20	10	7,45	8,09	7,80	0,338	0,171	0,302	0,014	0,020	0,043
	110	10	7,33	8,07	7,78	0,386	0,198	0,290	0,017	0,023	0,037

Через 360 ч экспозиции в промывном режиме оптическая плотность водных экстрактов гранул остается достаточно высокой, что свидетельствует об активизации органического вещества торфа и о повышении выхода водорастворимых гуминовых веществ в раствор.

Следует отметить, что за первые сутки водоустойчивость гранул снизилась на 50 % от первоначальной у образцов, полученных при температуре сушки 20 °C, и образцов с содержанием  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  7,5 %.

За 360 ч наблюдения максимальная водоустойчивость гранул (70 %) отмечена для образцов гранул с содержанием 25 % KCl и концентрацией стабилизирующей добавки  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  2,5 и 5,0 % при температуре сушки 90–110 °C.

Аналогичные тенденции наблюдаются в опыте с содержанием в гранулах 50 % KCl (табл. 2). Оптическая плотность водных экстрактов при 440 нм за первые 24 ч настаивания увеличивается от 0,245 до 0,357 с ростом концентрации стабилизирующей добавки  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  для всех температур сушки за счет увеличения доли образования водорастворимых гуматов аммония, а также происходит рост pH с 7,6 до 8,1. Через 192 ч экспозиции оптическая плотность водных экстрактов гранул снижается по сравнению с первыми экстрактами для всех температур сушки. Наблюдается также снижение величины pH водных экстрактов.

**Таблица 2. Влияние содержания добавки  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  на величину оптической плотности, pH водных экстрактов и водоустойчивость гранул с содержанием 50 % KCl при разных температурах сушки**

**Table 2. The effect of the content of the additive  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  on the optical density, pH of water extracts and water resistance of granules with a content of 50 % KCl at different drying temperatures**

$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ , %	Температура сушки, °C	Водоустойчивость гранул, %	рН		D (440 нм)		D (660 нм)	
			24 ч	192 ч	24 ч	192 ч	24 ч	192 ч
1,0	90	10	7,59	7,36	0,245	0,177	0,052	0,022
	110	10	7,61	7,39	0,263	0,188	0,030	0,023
	120	10	7,67	7,41	0,295	0,195	0,036	0,025
2,5	90	10	7,73	7,52	0,274	0,166	0,037	0,020
	110	10	7,69	7,49	0,306	0,190	0,043	0,023
	120	10	7,69	7,51	0,314	0,167	0,051	0,021
5,0	90	10	8,10	7,69	0,303	0,188	0,055	0,023
	110	10	8,02	7,62	0,338	0,183	0,045	0,024
	120	10	7,92	7,57	0,357	0,180	0,035	0,023

Гранулы с содержанием KCl 50 % и добавкой  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  обладают наименьшей водоустойчивостью из всех исследованных. В первые сутки целостность гранул снизилась на 50 % от первоначальной, через неделю она составила всего 10 %. Через 360 ч экспозиции в промывном режиме наблюдалось разрушение гранул практически на 90 %, что свидетельствует о необходимости введения дополнительной стабилизирующей добавки для получения водоустойчивых гранул пролонгированного действия с содержанием 50 % KCl.

С целью повышения влагостойкости питательных элементов в торфяных удобрениях, их агротехнической ценности и пролонгированности действия авторами [10] предлагается вносить в торфяные удобрения дополнительный сорбент – природный цеолитовый туф с последующим гранулированием торфоминерально-цеолитовой смеси. Внесение цеолитов приводит к повышению интенсивности механической переработки торфа и повышению содержания в нем коллоидных фракций. В процессе сушки происходит образование коллоидных оболочек на поверхности минеральных включений, что и определяет повышенную влагостойкость торфоминеральных удобрений. Поскольку цеолиты содержат в своем составе значительные количества кальция, нами было предположено сходное действие стабилизирующей добавки фосфата кальция.

Результаты исследования влияния на оптическую плотность и pH водных экстрактов гранул, полученных при различных температурах сушки на основе торфа с содержанием 50 % KCl, концентрации стабилизирующих добавок  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  и  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  представлены в табл. 3. Результаты исследований показали, что при содержании в гранулах KCl 50 % оптическая плотность при 440 нм водных экстрактов за первые 24 ч настаивания увеличивается от 0,172 до 0,283 с ростом концентрации стабилизирующих добавок  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  и  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  для всех температур сушки. Такая тенденция свидетельствует об увеличении доли образования водорастворимых гуматов и сопровождается ростом pH водных экстрактов с 6,22 до 7,46. С увеличением температуры сушки гранул, возможно, происходит увеличение степени разложения карбоната аммония с образованием амиака, его взаимодействие не только с гуминовыми веществами торфа с образованием водорастворимых гуматов аммония, но и с фосфатом кальция, поэтому оптическая плотность изменяется незначительно. Также несколько снижается pH водных экстрактов при одинаковой концентрации стабилизирующих добавок с ростом температуры сушки.

**Таблица 3. Влияние содержания добавок  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  и  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  на величину оптической плотности и pH водных экстрактов гранул с содержанием 50 % KCl, полученных при разных температурах сушки**

**Table 3. The effect of the content of the additives  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  and  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  on the optical density and pH of water extracts and water resistance of granules with a content of 50 % KCl at different drying temperatures**

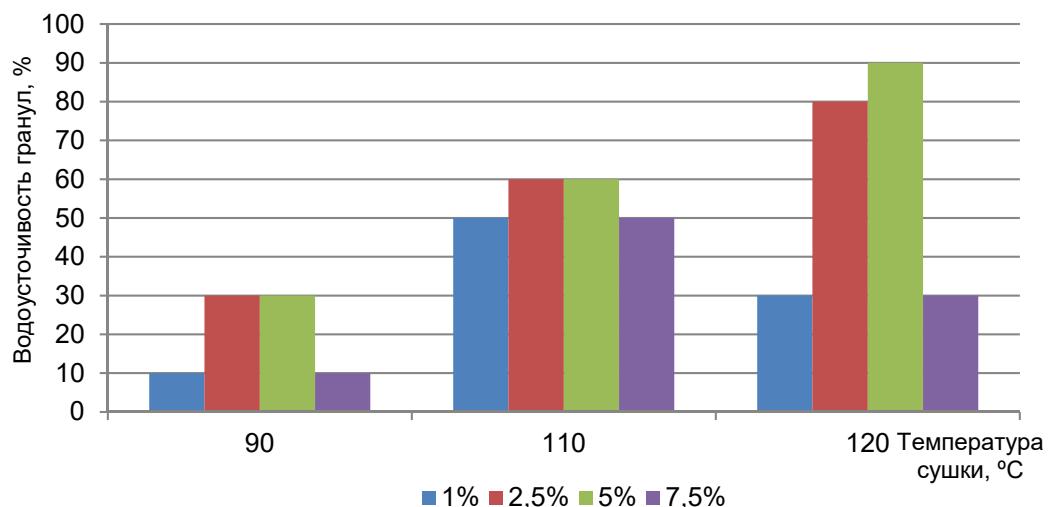
Содержание $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3/\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , %	Температура сушки, °C	pH			D (440 нм)			D (660 нм)		
		24 ч	192 ч	360 ч	24 ч	192 ч	360 ч	24 ч	192 ч	360 ч
1,0	90	6,37	7,23	7,50	0,172	0,138	0,208	0,003	0,013	0,030
	110	6,27	7,26	7,46	0,173	0,162	0,229	0,001	0,018	0,031
	120	6,22	7,18	7,43	0,175	0,170	0,213	0,002	0,015	0,028
2,5	90	6,90	7,75	7,79	0,217	0,326	0,833	0,021	0,027	0,112
	110	6,73	7,77	7,75	0,231	0,328	0,793	0,031	0,028	0,097
	120	6,68	7,78	7,74	0,240	0,318	0,974	0,031	0,027	0,147
5,0	90	7,45	8,07	8,06	0,281	0,356	0,891	0,040	0,027	0,128
	110	7,30	8,12	7,99	0,279	0,384	0,918	0,031	0,034	0,128
	120	7,19	8,16	7,90	0,277	0,407	0,996	0,031	0,045	0,160
7,5	90	7,46	7,64	7,84	0,256	0,149	0,177	0,008	0,018	0,022
	110	7,29	7,69	7,75	0,267	0,155	0,165	0,008	0,018	0,019
	120	7,31	7,67	7,71	0,283	0,130	0,163	0,006	0,013	0,019

При увеличении температуры сушки гранул, содержащих 50 % KCl, до 120 °C интенсивность переноса растворенных минеральных компонентов снижается вследствие быстрого отступления фронта испарения влаги, устойчивость минеральных компонентов возрастает.

Через 192 ч экспозиции оптическая плотность водных экстрактов гранул с содержанием стабилизирующих добавок 1,0 и 7,5 % снижается по сравнению с первыми экстрактами при всех температурах сушки. Для гранул, полученных с концентрацией стабилизирующих добавок 2,5 и 5,0 %, оптическая плотность при 440 нм водных экстрактов возрастает по сравнению с первыми экстрактами и составляет 0,329–0,407 при различных температурах сушки. Также наблюдается увеличение pH водных экстрактов с 7,75 до 8,16.

Через 360 ч экспозиции в промывном режиме оптическая плотность водных экстрактов гранул, полученных с концентрацией стабилизирующих добавок 2,5 и 5,0 %, фиксируется достаточно высокой (0,793–0,996), что свидетельствует об активизации органического вещества торфа и о повышении выхода водорастворимых гуминовых веществ в раствор. pH растворов остается практически неизменной. Для гранул с добавками 7,5 % оптическая плотность резко снижается и колеблется в интервале 0,163–0,177 при 440 нм. По-видимому, это связано с влиянием добавки фосфата кальция, повышение концентрации которой приводит к связыванию гуминовых веществ торфа ионами кальция с образованием нерастворимых гуматов кальция и снижению их содержания в растворе. При всех температурах сушки гранул pH экстрактов несколько снижается.

Результаты исследования влияния содержания стабилизирующих добавок  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  и  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  на водоустойчивость гранул при разных температурах сушки представлены на рисунке.



**Влияние концентрации добавок  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  и  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  на водоустойчивость гранул с содержанием 50 % KCl при разных температурах сушки**

**Effect of the concentration of additives  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  and  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  for water resistance granules containing 50 % KCl at different drying temperatures**

Введение в торф минеральных добавок, содержащих ионы  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , приводит к пептизации коллоидного вещества торфа и иммобилизации влаги, что, по мнению авторов [10], существенно повышает пластичность смеси. При оптимальной влажности происходит образование наиболее плотной композиции, имеющей после сушки максимальную прочность и влагостойкость. Устойчивость к вымыванию возрастает вследствие образования поверхностной корки при интенсивном обезвоживании гранул.

При содержании 50 % KCl наибольшую водоустойчивость (80–90 %) через 360 ч экспозиции проявили гранулы с содержанием 2,5 и 5,0 % стабилизирующих добавок  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  и  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  при температуре 120 °C.

**Заключение.** Таким образом, проведенные исследования показали, что создание удобрений на основе торфа с высоким содержанием хлористого калия возможно путем гранулирования торфоминеральной смеси, а также внесением в состав гранул стабилизирующих добавок, позволяющих повысить их водоустойчивость. Повышенная водоустойчивость содержащихся в гранулах питательных элементов позволяет рассматривать торфоминеральные гранулированные удобрения как пролонгированные – действующие продолжительный период времени. Максимальная водоустойчивость гранул КГУ с содержанием KCl 25 % отмечена при содержании стабилизирующей добавки  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  5 % и температуре сушки 110 °C. Максимальная водоустойчивость гранул КГУ с содержанием KCl 50 % наблюдалась при содержании до 5 % стабилизирующих добавок  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  и  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  и температуре сушки 110–120 °C.

Предотвращение вымываемости элементов минерального питания имеет большое значение с точки зрения минимизации их поступления в окружающую среду, что позволит существенно снизить загрязнение поверхностных и подземных вод сельскохозяйственных районов компонентами, содержащимися в минеральных удобрениях.

### Список использованных источников

1. Вильдфлущ, И. Р. Удобрения и их применение в современном земледелии : учеб.-метод. пособие / И. Р. Вильдфлущ, В. В. Лапа, О. И. Мишура ; под ред. И. Р. Вильдфлуша. – Горки : БГСХА, 2019. – 405 с.
2. Ягодин, Б. А. Агрохимия / Б. А. Ягодин, П. М. Смирнов, А. В. Петербургский. – М. : Агропромиздат, 1989. – 639 с.
3. Сельское хозяйство Республики Беларусь : стат. сб. – Минск, 2018. – С. 43–48.
4. Влияние осушительных мелиораций на химический состав вод р. Припяти и её притоков / И. И. Лиштван, А. В. Быстрай, В. М. Гращенко, А. А. Терентьев // Проблемы Полесья. – Минск : Наука и техника, 1983. – Вып. 8. – С. 128–134.
5. Вирясов, Г. П. Комплексные гранулированные удобрения на основе торфа / Г. П. Вирясов. – Минск : Наука и техника, 1988 – 158 с.
6. Соколов, Г. А. Агрэкологические и энергетические преимущества производства и использования комплексных гранулированных удобрений на основе торфа / Г. А. Соколов, Н. С. Гаврильчик // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 23–25 апр. 2014 г. – Ч. 1. – С. 49–53.
7. Мельников, Л. Ф. Органоминеральные удобрения. Залог экологической и продовольственной безопасности / Л. Ф. Мельников. – 2013. – 536 с.
8. Бамбалов, Н. Н. Новое поколение органоминеральных гранулированных удобрений пролонгированного действия / Н. Н. Бамбалов, Г. А. Соколов // Земледелие и защита растений. – 2020. – № 2. – С. 18–19.
9. Сосновская, Н. Е. Активизация гуминовых веществ в процессе получения комплексных органоминеральных гранулированных удобрений / Н. Е. Сосновская, Н. Н. Бамбалов, Г. А. Соколов // Повышение плодородия почв и применение удобрений : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 14 февр. 2019 г. – С. 107–108.
10. Алексеева, Т. П. Комплексные органоминеральные удобрения пролонгированного действия на основе торфа / Т. П. Алексеева, В. Д. Перфильева, Г. Г. Криницын // Химия растительного сырья. – 1999. – № 4. – С. 53–59.

### References

1. Vil'dflush I. R., Lapa V. V., Mishura O. I. *Udobreniya i ih primenenie v sovremennom zemledelii : ucheb.-metod. posobie* [Fertilizers and their application in modern agriculture : a textbook ; ed. I. R. Vil'dflush]. Gorki, 2019, 405 p. (in Russian)
2. Yagodin B. A., Smirnov P. M., Peterburgskij A. V. *Agrohimiya* [Agrochemistry]. Moscow, 1989, 639 p. (in Russian)
3. Sel'skoe hozyajstvo Respubliki Belarus' [Agriculture of the Republic of Belarus]. Statisticheskij sbornik [Statistical Collection]. Minsk, 2018, pp. 43–48. (in Russian)
4. Lishtvan I. I., Bystraya A. V., Grashchenko V. M., Terent'ev A. A. *Vliyanie osushitel'nyh melioracij na himicheskij sostav vod r. Pripyati i eyo pritokov* [The influence of drainage reclamation on the chemical composition of the waters of the Pripyat river and its tributaries ]. Problemy Poles'ya = Polesie Problems. Minsk, Science and Technology Publ., 1983, vol. 8, pp. 128–134. (in Russian)
5. Viryasov G. P. *Kompleksnye granulirovannye udobreniya na osnove torfa* [Complex granulated fertilizers on basic of peat]. Minsk, 1988, 157 p. (in Russian)
6. Sokolov G. A., Gavril'chik N. S. *Agroekologicheskie i energeticheskie preimushchestva proizvodstva i ispol'zovaniya kompleksnyh granulirovannyh udobreniy na osnove torfa* [Agroecologic and energetic preferences of production and using of complex granulated fertilizers on basic of peat]. Aktual'nye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii [Proc. Int. conf. "Actual sci-practical and ecological problems of environmental protection"]. Brest, April 23–25, 2014, part 1, pp. 49–53. (in Russian)
7. Mel'nikov L. F. *Organomineral'nye udobreniya. Zalog ekologicheskoy i prodovol'stvennoy bezopasnosti* [Organomineral fertilizers. Guaranty of ecological and food safety]. Minsk, 2013, 536 p. (in Russian)
8. Bambalov N. N., Sokolov G. A. *Novoe pokolenie organomineral'nyh granulirovannyh udobreniy prolongirovannogo deystviya* [New generation of organomineral granulated fertilizers of prolonged action]. Agriculture and protection of plants, 2020, no. 2, pp. 18–19. (in Russian)
9. Sosnovskaya N. E., Bambalov N. N., Sokolov G. A. *Aktivizaciya guminovyh veshchestv v processe poluchenija kompleksnyh organomineral'nyh granulirovannyh udobreniy* [Activation of humic substances under giving of complex organomineral granulated fertilizers]. Povyshenie plodorodiya pochv i primenenie udobreniy : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Proc. Int. conf. "Increase of soil fertility and use of fertilizers"]. Minsk, February, 14, 2019, pp. 107–108. (in Russian)
10. Alekseeva T. P., Perfil'eva V. D., Krinicyn G. G. *Kompleksnye organo-mineral'nye udobreniya prolongirovannogo dejstviya na osnove torfa* [Complex organomineral fertilizers of prolonged action based on peat]. Himiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of plant raw materials, 1999, no. 4, pp. 53–59 (in Russian)

**Информация об авторах**

*Сосновская Наталья Евгеньевна* – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: natalisosnov@mail.ru

*Ракович Вячеслав Александрович* – кандидат технических наук, заведующий лабораторией биогеохимии и агроэкологии, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: mire4@tut.by

*Красноберская Ольга Георгиевна* – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: olgakrasnoberskaya@gmail.com

**Information about the authors**

*Natalia E. Sosnovskaya* – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Associate Professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus. E-mail: natalisosnov@mail.ru

*Vyacheslav A. Rakovich* – Ph. D. (Technical), Head of Laboratory of Biogeochemistry and Agroecology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: mire4@tut.by

*Olga G. Krasnoberskaya* – Ph. D. (Agricultural), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: olgakrasnoberskaya@gmail.com

## ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-2-185-194>

УДК 551.3+550.7+551.438.2(476.1/.4/.6)

Поступила в редакцию 01.09.2022

Received 01.09.2022

### РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ БИОГЕННОГО СЕДИМЕНТО- И МОРФОГЕНЕЗА НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ БЕЛАРУСИ

Е. А. Кухарик

*Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности развития современных биогенных геологических процессов на территории Центральной Беларуси. Исследования базировались на анализе опубликованных научных, картографических и фондовых материалов, полевых работах, маршрутных наблюдениях и замерах, материалах дистанционных съемок. Установлено, что одним из наиболее активно проявляющихся современных биогенных геологических процессов является болотообразование, развивающееся на площади около 8000 км<sup>2</sup> и характеризующееся накоплением торфа и формированием своеобразного комплекса фитогенного рельефа. Заболачивание земель развивается на площади около 17 700 км<sup>2</sup>. Описаны условия и факторы процессов биогенного седименто- и морфогенеза. Аккумуляция органогенных отложений (сапропелей и торфов) протекает также в котловинах естественных и искусственных водоемов и к настоящему времени привела к формированию толщ мощностью в основном 3–5 м (до 30 м). Охарактеризована роль геологической деятельности животных и растительных организмов в трансформации рельефа земной поверхности и строения слагающих ее пород.

**Ключевые слова:** современные экзогенные геологические процессы; биогенный седименто- и морфогенез; современная геодинамика; Центральная Беларусь.

**Для цитирования.** Кухарик Е. А. Развитие процессов биогенного седименто- и морфогенеза на территории Центральной Беларуси // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 185–194.

### THE DEVELOPMENT OF THE PROCESSES OF BIOGENIC SEDIMENT- AND MORPHOGENESIS ON THE TERRITORY OF CENTRAL BELARUS

Е. А. Kukharik

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** The peculiarities of the developments of modern biogenic geological processes on the territory of Central Belarus are considered in the article. The research grounded on the analysis of published scientific, cartographic and fund materials, field works, route observations and measuring, the materials of distance shooting. It is established that marshes formation is one of the most active indicating modern biogenic geological process, developing on the area around 8000 km<sup>2</sup> and characterized by the accumulation of peat and the formation of the peculiar complex of phytogenic relief. Soils bogging develops on the area around 17 700 km<sup>2</sup>. The conditions and factors of biogenic and sediment- and morphogenesis are described. The accumulation of organogenic sediments (sapropel and peat) take their place also in basins of nature and artificial origin and till the present time leads to thicknesses formation with the capacity of mainly 3–5 m (up to 30 m). The role of geological activity of animals and plant organisms in the transformation of earth surface relies and the structure of rocks making it up is characterized.

**Keywords:** modern exogenous geological processes; biogenic sedimentogenesis and morphogenesis; modern geodynamics; central Belarus.

**For citation.** Kukharik, E. A. The development of the processes of biogenic sediment- and morphogenesis on the territory of Central Belarus. *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 185–194.

**Введение.** Современные биогенные геологические процессы, получившие широкое развитие на территории Центральной Беларуси, особенно в ее южной части, являются одними из активнейших экзогенных агентов трансформации состава и строения покровных отложений и рельефа земной поверхности. Среди них наиболее распространенными являются процессы, развивающиеся на площадях, подверженных постоянному (болота) или периодическому (заболоченные земли) переувлажнению. Кроме перечисленных процессов заметное распространение получила седimentация органических осадков, протекающая в котловинах озер, водохранилищ и прудов. Определенный вклад в динамику земной поверхности региона также вносит деятельность животных и растительных организмов. Рассмотрению особенностей проявления всех перечисленных выше биогенных процессов посвящена настоящая работа.

Обращаясь к истории изучения этих процессов на территории Беларуси, следует отметить, что исследовательские работы с разной степенью детальности начали выполняться с конца XIX в. Первые научные материалы по рассматриваемым проблемам были опубликованы Ф. Я. Бахтеевым [1], В. С. Доктуровским [2], А. Д. Дубахом [3], И. И. Жилинским [4], Н. С. Козловым [5], И. С. Лупиновичем [6], А. П. Пидопличко [7, 8], С. Н. Тюремновым [9, 10]. В дальнейшем значительный вклад в изучение процессов биогенного седименто- и морфогенеза внесли Н. Н. Бамбалов [11–13], А. Н. Галкин [14], Н. Ф. Гречаник [15], В. П. Зерницкая [16], Б. В. Курзо [17], Т. И. Кухарчик [18], И. И. Лиштван [19], М. З. Лопотко [20], А. В. Матвеев [21], В. А. Ракович [12, 22], С. Г. Скоропанов [23], И. Г. Тановицкий [24] и др. Наиболее значимые работы по общим вопросам развития биогенных геологических процессов и их проявления в отдельных крупных регионах опубликовали С. И. Болысов [25], С. В. Васильев [26], Л. И. Инишева [27], Н. Я. Кац [28], В. И. Косов [29], О. Л. Лисс [30], Н. И. Пьявченко [31], В. Н. Сукачев [32], В. Л. Телицын [33, 34], Р. Ilnicki [35], R. Lindsay [36] и др.

**Материалы и методы исследований.** Исследование проявлений современных биогенных процессов на территории Центральной Беларуси проводили с использованием комплексной методики, которая включает анализ опубликованных и фондовых источников, полевые работы, маршрутные наблюдения и замеры, изучение материалов дистанционных съемок, картометрические и картосоставительские мероприятия. При оконтуривании болотных массивов и заболоченных пространств использовали почвенную карту и карту болот Беларуси, опубликованные в Национальном атласе Беларуси, топографические карты различных годов издания и масштабов, а также данные торфяных кадастров и материалы полевых наблюдений на ключевых участках. Особенности биогенной седиментации в котловинах озер и водохранилищ были установлены при изучении разрезов буровых скважин и фондовых материалов. При характеристике роли животных и растительных организмов в трансформации строения и состава толщи покровных отложений и рельефа земной поверхности региона использовали опубликованные материалы и данные полевых и маршрутных исследований, что позволило охарактеризовать морфологические выражения геологической деятельности живых организмов. Картографические построения и компьютерную обработку графического материала выполняли в геоинформационной системе QGIS 3.22.1 и графическом редакторе CorelDRAW 2018.

**Определение некоторых понятий и терминов.** Прежде чем перейти к изложению основного материала статьи, необходимо выполнить уточнение терминологических вопросов, связанных прежде всего с соотношением и объемом понятий «болото» и «заболоченные земли», а также определить особенности проявляющихся в пределах болот и заболоченных пространств современных геологических процессов.

В публикациях по инженерной геологии и геодинамике в соответствии с принятыми в этих научных направлениях теоретическими положениями термины «болото» и «заболоченные земли», за исключением самых общих формулировок, различаются по количественным показателям мощности накопившегося торфа. Так, в работе [14, с. 331] в широком понимании болотом называется участок земной поверхности, постоянно или большую часть года насыщенный водой и покрытый специфической болотной растительностью. В этой же публикации дано определение рассматриваемых терминов в узком смысле: болотом называется избыточно увлажненный участок суши с мощностью торфа не менее 30 см (в неосушеннем виде), а переувлажненные земли, покрытые слоем торфа менее 30 см или вовсе не имеющие его, называются заболоченными землями. Эти определения приведены по аналогии с теми, которые были ранее опубликованы в работах [37–39] и др. Нужно сказать, что подобные формулировки терминов не в полной мере отражают действительную картину протекающих в пределах болот и заболоченных земель процессов, на что указывает в своих работах Н. Н. Бамбалов [12, 13]. Принятый в них граничный показатель мощности торфа в 30 см, используемый для разделения болот и заболоченных земель, носит условный характер и практически не применяется в теоретическом и практическом болотоведении. В связи с вышесказанным, используя теоретические разработки Н. Н. Бамбалова, будем считать болотом избыточно увлажненный участок территории, на котором произрастает влаголюбивая растительность и происходят процессы образования и аккумуляции торфа, а к заболоченным землям будем относить избыточно увлажненные участки, покрытые влаголюбивой растительностью, не имеющие торфяного слоя [13, с. 24].

С учетом принятых в настоящей работе определений необходимо кратко высказаться о различиях в особенностях проявления современных геологических процессов в болотных массивах и на заболоченных площадях. Так, главным процессом в пределах болот является торфонакопление, т. е. поступление органического вещества в течение годового биоцикла преобладает над его минерализацией – протекает болотообразовательный процесс. Это обуславливает постепенное поднятие над минеральным субстратом земной поверхности. Важно учитывать, что при наличии на определенном участке торфяной толщи даже самой минимальной мощности его следует считать болотом, так как мощность аккумулированного торфа в этом случае зависит от длительности и интенсивности процесса торfonакопления, а сам факт начала образования торфа говорит о переходе от процесса заболачивания к болотообразованию. На заболоченных территориях накопления торфа не происходит: в условиях периодического избыточного увлажнения верхних горизонтов покровных отложений и в присутствии влаголюбивой растительности поступающее в течение годового биоцикла органическое вещество полностью минерализуется и превраща-

ется в гумус – развивается процесс заболачивания. Рассматривая логическую структуру процесса формирования болотного массива Л. И. Инишева [27] считает, что заболачивание земель не является синонимом термина «болотообразование», хотя образование болота включает в себя собственно заболачивание территории, т. е. оно является начальной стадией потенциально реализующегося болотообразовательного процесса и характеризуется обратимостью в результате колебаний условий увлажнения, смены аэробных условий анаэробными в течение года и т. д.

**Результаты и их обсуждение.** Среди биогенных процессов на территории Центральной Беларуси получили развитие торфонакопление, заболачивание земель, аккумуляция биогенного материала в котловинах естественных и искусственных водоемов и геологическая деятельность живых организмов.

В исследуемом регионе болотами занято около 8000 км<sup>2</sup> (8,5 % от общей площади региона). Болотные массивы отсутствуют в пределах наиболее возвышенных и хорошо дренируемых моренных равнин, краевых ледниковых образований (Минская, Новогрудская, Гродненская, Оршанская, Волковысская, Слонимская возвышенности; Ошмянская и Копыльская гряды; Костюковичская, Могилёвская, Славгородская, Чечерская, Лидская, Столбцовская равнины) и широко представлены на равнинных и низинных пространствах (Любчанская, Барановичская, Солигорская, Бобруйская, Центральноберезинская, Стрешинская, Чечерская, Пуховичская, Бобруйская, Славгородская равнины) (рис. 1). В условиях присутствия в разрезе покровных отложений лёссовидных пород и близкого залегания к дневной поверхности мергельно-меловых толщ слабо заболочена левобережная часть бассейна р. Днепр. Здесь сформировались незначительные по площади болота в отрицательных формах рельефа карстового или суффозионного генезиса [12].

Благоприятными факторами для образования болот в регионе являются влажный климат, равнинный или низинный характер рельефа земной поверхности и близкое положение к ней уровня подземных вод. В большинстве случаев первичными очагами развития болотообразовательного процесса выступают водоемы или участки суши с отрицательными формами рельефа [34], поэтому формирование болота может происходить двумя путями – зарастанием водоемов и заболачиванием суши.

Зарастание (заторфовывание) водоемов происходит в результате поясного развития растительности от прибрежных участков вглубь котловины, в центральной части которой также идет аккумуляция органических и минеральных осадков. По данным работы [12] болотные массивы, расположенные в северной части центрально-белорусского региона, образовались преимущественно путем зарастания водоемов. В настоящее время процесс заторфовывания водоемов в регионе продолжается, так как для большинства современных озер характерна тенденция к эвтрофированию.

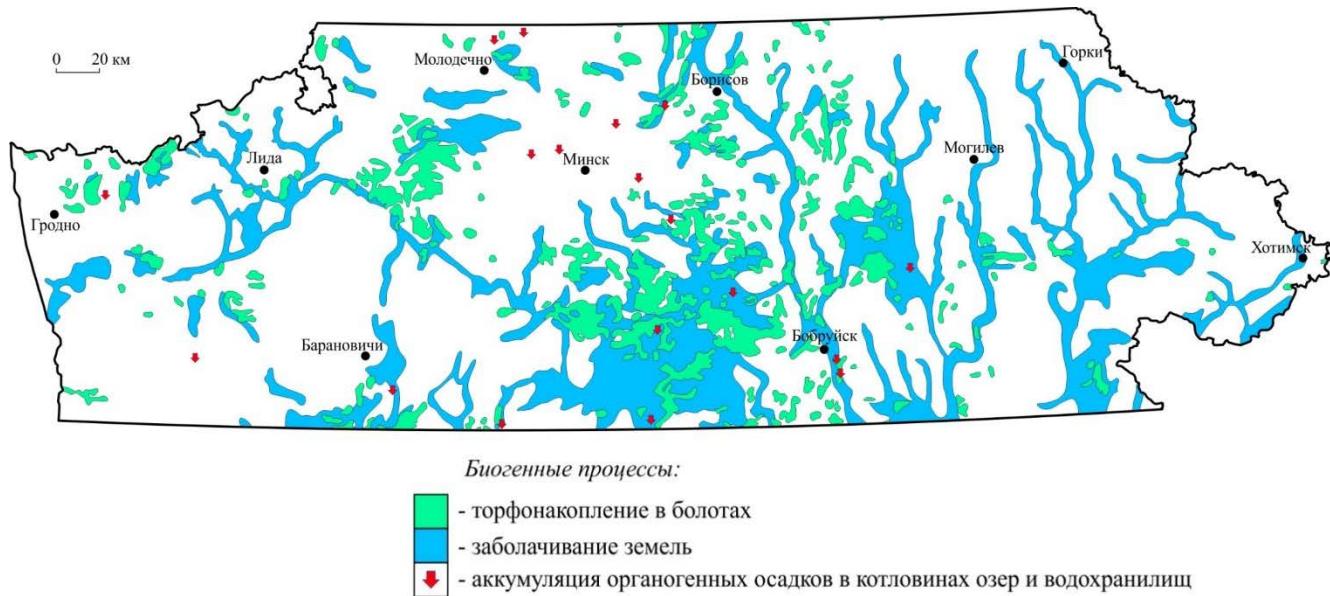
Второй сценарий формирования болотного массива – заболачивание суши (суходольное заболачивание) – реализуется при условии избыточного увлажнения территории. Заполняя поровое пространство почвогрунтов, вода затрудняет поступление в них кислорода. Происходит нарушение газового режима, сопровождаемое развитием восстановительного процесса и оглеением грунта. Эти трансформации подавляют жизнедеятельность аэробных организмов (сaproфагов), что ведет к аккумуляции слаборазложившихся растительных остатков [25, 27]. Торф, обладающий большой водоудерживающей способностью, обеспечивает постоянный избыток влаги, как на территории самого болотного массива, так и на границе болото – суходол, в результате чего болотообразование распространяется и на прилегающие территории. Например, растения-торфообразователи, такие как сфагnum, осоки, тростник, на 1 г сухой растительной массы способны удерживать 23,0, 3,0 и 2,5 г воды соответственно [40]. По мнению К. Е. Иванова [41], преобладающая часть современных болот образовалась путем заболачивания суши, а крупные болотные массивы возникли в результате слияния и разрастания по латерали более мелких по размерам болот. Установлено, что в разные периоды голоцене прирост торфяного слоя составлял от 0,5 до 1,9 мм/год, что эквивалентно в среднем 117 кг/га органического вещества [12, 13]. Используя этот показатель, расчетным путем получаем, что ежегодно на болотах Центральной Беларуси аккумулируется около 94,3 тыс. т органогенных отложений.

На территории Центральной Беларуси присутствуют болота трех типов: низинные (эвтрофные), переходные (мезотрофные), верховые (олиготрофные).

Низинные болота располагаются чаще всего в понижениях рельефа, имеют грунтовое питание. Мощность торфяного слоя в среднем составляет 1,0–2,0 м, реже – более 6,0 м (болото Усяж – 7,4 м, болото Саломенка – 7,0 м). Для них характерна плоская или слабовогнутая поверхность, в депрессиях формируются небольшие озера (рис. 2). Часто на низинных болотах развивается грядово-мочажинный комплекс. Нанорельеф представлен кочками высотой до 0,3–0,7 м. Состав растительности: деревья (сосна, береза, ольха черная), кустарники (ива, береза низкая), травы (таволга, вахта, сабельник, хвощ, осоки), мхи (гипновые и сфагновые) и др. [21, 42]. Болота низинного типа в регионе широко распространены в долинах рек Немана, Щары, Случи, Свислочи, Березины. Наиболее крупными болотными массивами такого типа в регионе являются Кореличи (17470 га), Багно-Схеда (11 306 га), Лошанский торфмассив (11 028 га), Горячий Бор (9255 га), Сутино (9016 га), Корма (5480 га) [43].

Переходные болота находятся на промежуточной стадии развития между низинным и верховым торфянником и встречаются сравнительно редко. Мощность торфяного слоя – в среднем 1,8–2,5 м. Имеют смешанное питание (грунтовые, поверхностные воды и атмосферные осадки). Растительность – сфагновые и гипновые мхи, травы (осоки, вахта, сабельник), кустарнички (багульник, голубика, болотный мирт,

клюква), кустарники (ива, береза низкая), деревья (сосна, береза) [42]. Встречаются в междуречье Случи и Птичи, в долине р. Березины, на незначительных по площади участках (обычно не более 50–100 га) в западной и восточной частях исследуемого региона. Крупнейшие болота переходного типа на территории Центральной Беларусь: Поречский Моз (4202 га), Задворное-Островское (821 га), Салажки (683 га), Ягодное (659 га), Старосельское (450 га), Омша (262 га) [43].



**Рис. 1. Схема проявления процессов торфонакопления и заболачивания земель на территории Центральной Беларуси**

**Fig. 1. Scheme of peat accumulation and bogging processes manifestation in the Central Belarus territory**



**Рис. 2. Поверхность низинного болота, расположенного недалеко от д. Новоселки Мядельского района Минской области**

**Fig. 2. The surface of a lowland swamp located near the village of Novoselki, Myadelsky district, Minsk region**

Верховые болота в Центральной Беларусь формируются на водоразделах, питание их преимущественно атмосферное. Мощность торфа – 2,0–4,0 м, иногда – до 9,0 м и более (болото Ореховский Моз – 10,5 м). Имеют выпуклую в плане поверхность, причем превышение центральной части массива

над окраинами может составлять 1,5–3,0 м [12]. Поверхность верховых болот осложнена кочками, грядово-мочажинным рельефом, пологими котловинами, занятymi озерами. Растительность представлена деревьями (сосна), кустарничками (багульник, болотный мирт, вереск, клюква и др.), травами (пушица, росянка, морошка, шейхцерия), формируется сплошной покров сфагновых мхов [42]. Верховые болота расположены в междуречье рек Немана и Котры, Березины и Друти, на территории Центральноберезинской и Пуховичской равнин. Наибольшие по площади верховые болота в регионе – Докудовское (7339 га), Ореховский Моз (6421 га), Есмоновский Моз (4199 га), Славное (4144 га), Островы Дулебы (3712 га), Годылево (3344 га) [43].

Более широко по сравнению с торфонакоплением распространен процесс заболачивания земель, который на территории Центральной Беларуси проявляется на площади 17 700 км<sup>2</sup> (18,6 % от общей площади региона). Заболачивание развивается на обширных пространствах в пределах долин рек Днепра, Немана, Березины, Сожа, Беседи, Птичи, Случи, Орэссы, Морочи, окаймляя в центральной части исследуемого региона крупные по площади разнотипные болотные массивы (см. рис. 1).

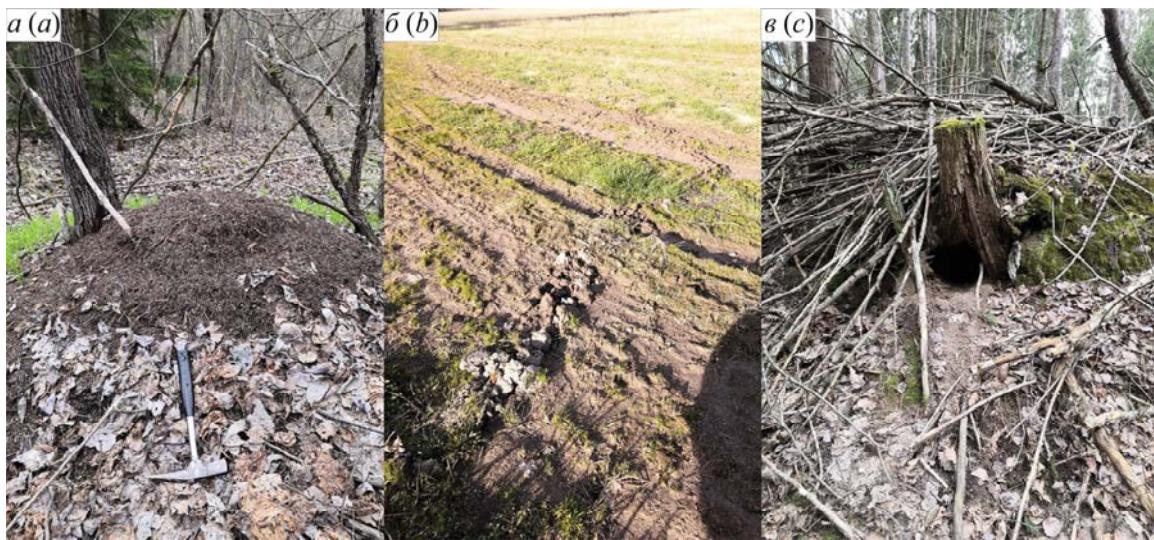
По материалам работы [13], процессы седименто- и морфогенеза на заболоченных землях коренным образом отличаются от процессов, протекающих в болотах. Так, на заболоченных пространствах условия увлажнения никогда не бывают постоянными. Обычно наблюдается чередование периодов избыточного увлажнения грунтов и подсыхания, когда уровень грунтовых вод понижается и корнеобитаемый слой почв находится в аэробной обстановке. В зависимости от длительности этих периодов формируются почвы с различной степенью гидроморфизма (полугидроморфные): глеевые, глееватые, слабоглеевые. По данным Ф. Р. Зайдельмана [44], они образуются под влиянием пяти гидрологических факторов: атмосферных, намывных склоновых, намывных русловых, грунтовых и грунтово-напорных вод.

Проявляющееся чередование периодов переувлажнения и усыхания на территориях, подверженных заболачиванию, препятствует возможности аккумуляции и консервации органического вещества, поэтому торфонакопления не происходит. Кроме этого, поступающее органическое вещество в течение среднегодового биоцикла полностью минерализуется с образованием гумуса при условии достаточной аэрации верхних слоев покровных отложений. Трансформация рельефа земной поверхности на заболоченных землях минимальна, в отличие от занятых болотами территорий, так как здесь не аккумулируется торф и не наблюдается повышение относительных отметок, практически не формируются характерные для болот формы нано-, микро- и мезорельефа в виде кочек, грядово-мочажинных комплексов и др.

Отдельно стоит рассмотреть процесс биогенной седиментации в котловинах водоемов. По данным работы [45], в Центральнобелорусском регионе насчитывается порядка 300 озер с площадью водного зеркала преимущественно до 20 га. Также биогенное осадконакопление случается в резервуарах искусственных водоемов – водохранилищ и прудов. В условиях гумидной зоны в пресноводных водоемах происходит аккумуляция сапропеля – илистых органоминеральных отложений пресных континентальных водоемов, содержащих свыше 15 мас.% органического вещества, и по мере его накопления идут заполнение котловины водоема и ее постепенное обмеление, обусловливающее возрастание биопродуктивности. При дальнейшем развитии этого процесса водоем превратится в болото. Мощность органогенных осадков в озерах составляет в среднем 3–5 м, а ее наибольший показатель зафиксирован в оз. Судобле Смолевичского района Минской области – 30 м [21, 45].

При рассмотрении биогенных процессов нельзя не упомянуть о геологической деятельности животных и растительных организмов, проявляющейся практически повсеместно. Согласно выводам В. Н. Островского [46], определенное воздействие на геологическую среду и особенности проявления некоторых современных геологических процессов оказывают дикие и домашние животные. Например, почвенная микрофауна (дождевые черви, многоножки и др.) способна перемешивать грунт на глубину до 5 м, что приводит к его дезинтеграции, повышению проницаемости покровных отложений, снижению защищенности подземных вод от загрязнения, способствует активизации суффозии, проседания земной поверхности. Большую работу по транспортировке грунтов и созданию пустот в толще покровных отложений выполняют мышевидные грызуны и другие роющие животные. Зоогенные формы рельефа, которые представляют собой морфологическое выражение их геологической работы, можно встретить довольно часто. К ним относятся муравейники, кротовины, норы, ямы, бобровые хатки, плотины и др. (рис. 3).

Некоторые из зоогенных форм рельефа достигают значительных размеров. Например, бобровые постройки достигают высоты 3 и 12 м в поперечнике, а в исключительных случаях могут иметь длину до 100–200 м. Повсеместно встречающиеся в лесной зоне муравейники возвышаются иногда на 2–3 м. Холмики кротовин довольно часто формируют ярус микрорельефа обрабатываемых участков [21]. При прокладке ходов кроты могут подкапывать корни плодовых деревьев и кустарников, чем наносят заметный материальный ущерб. Определенный вклад в динамику земной поверхности на локальных участках может вносить выпас скота (пастбищная дигрессия) [46]. Наиболее заметны последствия пастбищной дигрессии в пределах эксплуатируемых пастбищ, вдоль проселочных дорог, а также по берегам рек, озер и каналов, используемых в качестве мест для водопоя. Уничтожение естественной растительности и нарушение залегания верхних слоев слагающих земную поверхность пород при прохождении животных способствуют активизации процессов плоскостного смысла, овражной эрозии, дефляции.



**Рис. 3. Зоогенные формы рельефа, встреченные во время полевых работ в окрестностях аг. Рованичи Червенского района Минской области:**  
а – опадный муравейник; б – кормовые кротовые норы; в – лисья нора

**Fig. 3. Zoogenic landforms identified during field work  
in the vicinity of the agrotown of Rovanichi, Cherven district, Minsk region:  
a – plant litter anthill; b – mole fodder burrow; c – foxy burrow**

Наряду с вкладом животных в трансформацию рельефа земной поверхности и покровных отложений определенную роль в этом процессе играют и растительные организмы. Кроме рассмотренных ранее фитогенных форм рельефа, развивающихся в пределах болотных массивов (болотные кочки, грядово-мочажинные комплексы и др.), нужно отметить развивающиеся при наличии лесной, луговой и околоводной растительности морфологически выраженные дернинные кочки, приствольные и искорные бугры, искорные и пневые ямы, различные корневые формы, фитогенные валы, терраски и др. [15, 25].

Развитие биогенных процессов приводит к ряду положительных и негативных последствий для окружающей среды. Положительным можно считать тот факт, что после проведения мелиоративных работ торфяно-болотные почвы, обладающие высоким потенциальным плодородием, после вовлечения в сельскохозяйственный оборот обеспечивают получение стабильных и высоких урожаев. Однако интенсивное использование таких земель влечет за собой развитие сработки торфа, активизацию водно-эрозионных процессов, дефляции. Среди других неблагоприятных последствий развития биогенных процессов необходимо отметить, что болотообразование и наличие на земной поверхности толщ органогенных отложений осложняют и удорошают процесс строительства зданий и сооружений, так как такие грунты обладают низкой или недостаточной несущей способностью, являются средне- и сильноожимаемыми, причем эти характеристики находятся в зависимости от степени их увлажнения и фазового состояния в них влаги [14, 38]. На территориях с периодическим переувлажнением верхних горизонтов покровных отложений возможны трудности при их инженерно-техническом или строительном освоении, ведь при планировании и проведении подобных работ необходимо предусматривать мероприятия по регулированию водного режима, предупреждению негативного воздействия влаги на фундаменты зданий, несущую способность грунтов и т. д.

Отдельно нужно рассмотреть негативные последствия развития процесса оглеения на заболоченных пространствах. Глеообразование представляет собой кислотный гидролиз в анаэробной среде в условиях двух типов водного режима: застойного и застойно-промывного. Характер воздействия оглеения на минеральный состав почв и материнских пород определяется одним из двух перечисленных типов водного режима. Так, в условиях застойного водного режима не происходит существенного изменения химических свойств почв и пород. Однако при проведении осушения этих земель почвы, ранее развивавшиеся в застойных условиях, оказываются под воздействием застойно-промывного режима, что вызывает развитие деградационных явлений: рост показателя кислотности ( $\text{pH}$ ); вынос  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Fe}$ ; увеличение плотности сложения; уменьшение порозности и водопроницаемости за счет разрушения почвенной структуры. Перечисленные явления отрицательно влияют на агрономические свойства почв. Для предотвращения развития этих негативных последствий требуется реализация комплекса агротехнических и мелиоративных мероприятий [44, 47].

**Заключение.** На современном этапе процессы биогенного седименто- и морфогенеза играют существенную роль в трансформации облика земной поверхности и строения верхних горизонтов покровных отложений территории Центральной Беларуси. Наиболее активным и относительно широко распространенным в регионе является болотообразовательный процесс с присущей ему аккумуляцией торфа. Торфонакопление в болотных массивах происходит на площади примерно 8000 км<sup>2</sup>.

Кроме собственно накопления органогенных отложений, на территории болота формируется своеобразный фитогенный рельеф, представленный болотными кочками, грядово-мочажинными комплексами и другими формами. Заболачивание земель, характеризующееся переменным увлажнением верхних горизонтов покровных отложений, отсутствием торфонакопления и аккумуляцией органических веществ в виде гумуса, развито на площади около 17 700 км<sup>2</sup>. Биогенное осадконакопление протекает также в котловинах естественных и искусственных водоемов, характеризуется аккумуляцией сапропелей и торфов и к настоящему времени привело к формированию толщ мощностью в основном 3–5 м (до 30 м). Заметный вклад в динамику рельефа земной поверхности и изменение слагающих ее пород вносит также геологическая деятельность животных и растительных организмов, распространенная в исследованном регионе практически повсеместно, в результате чего формируются комплексы зоо- и фитогенного рельефа. Развитие биогенных геологических процессов оказывает определенное негативное воздействие на условия хозяйственного освоения территорий, удорожает проектные и строительные работы, ведет к ухудшению агрономических характеристик почв.

#### Список использованных источников

1. Бахтеев, Ф. Я. Значение торфа в народном хозяйстве БССР / Ф. Я. Бахтеев // Торф и его использование в народном хозяйстве : труды апрельской сессии 1934 г. Белорусской академии наук / отв. ред. В. М. Шпенцер, Ф. Я. Бахтеев. – Минск : Изд-во БАН, 1935. – С. 15–44.
2. Доктуровский, В. С. Болота, строение и развитие их / В. С. Доктуровский. – Бендеры : Мастерская учеб. пособий Бендерск. земства, 1915. – 68 с.
3. Дубах, А. Д. Гидрология болот / А. Д. Дубах ; под ред. Л. К. Давыдова. – Свердловск ; М. : Гидрометеоиздат, 1944. – 227 с.
4. Жилинский, И. И. Очерк работ Западной экспедиции по осушению болот (1873–1898) / И. И. Жилинский. – СПб. : Изд. М-ва землед. и гос. имуществ, 1899. – 744 с.
5. Козлов, Н. С. Проблема сапропелей в БССР / Н. С. Козлов // Торф и его использование в народном хозяйстве : труды апрельской сессии 1934 г. Белорусской академии наук / отв. ред. В. М. Шпенцер, Ф. Я. Бахтеев. – Минск : Изд-во БАН, 1935. – С. 293–303.
6. Лупинович, И. С. Торфяно-болотные почвы БССР и их плодородие / И. С. Лупинович, Т. Ф. Голуб ; под ред. В. А. Kovды. – Минск : Изд-во Академии наук БССР, 1958. – 315 с.
7. Пидопличко, А. П. Торфяные месторождения Белоруссии: генезис, стратиграфия и районирование / А. П. Пидопличко ; под ред. М. И. Нейштадта. – Минск : Изд-во Академии наук БССР, 1961. – 192 с.
8. Пидопличко, А. П. Озерные отложения Белорусской ССР / А. П. Пидопличко ; под ред. И. И. Лиштвана. – Минск : Наука и техника, 1975. – 117 с.
9. Тюремнов, С. Н. История развития торфянников БССР в послепедниковое время / С. Н. Тюремнов // Сб. науч. тр. Ин-та торфа Академии наук БССР. – 1951. – Вып. I. – С. 88–111.
10. Тюремнов, С. Н. Торфяные месторождения / С. Н. Тюремнов. – М. : Недра, 1976. – 488 с.
11. Бамбалов, Н. Н. Болотообразовательные процессы на территории Белоруссии / Н. Н. Бамбалов, А. Г. Дубовец, С. Г. Беленький // Проблемы Полесья. – 1990. – Вып. 13. – С. 75–90.
12. Бамбалов, Н. Н. Роль болот в биосфере / Н. Н. Бамбалов, В. А. Ракович. – Минск : Белорусская наука, 2005. – 285 с.
13. Бамбалов, Н. Н. Об отличиях болот от заболоченных земель / Н. Н. Бамбалов // Природные ресурсы. – 2009. – № 2. – С. 20–25.
14. Инженерная геология Беларуси : в 3 ч. / А. Н. Галкин [и др.] ; под ред. В. А. Королева. – Витебск : ВГУ, 2016–2018. – Ч. 2 : Инженерная геодинамика Беларуси / А. Н. Галкин [и др.] ; под ред. В. А. Королева. – Витебск, 2017. – 452 с.
15. Гречаник, Н. Ф. Биогенные формы рельефа : учеб.-метод. пособие / Н. Ф. Гречаник. – Брест : БрГУ, 2016. – 89 с.
16. Зерницкая, В. П. Позднепедниковые и голоцен Беларуси: геохронология, осадконакопление, растительность и климат / В. П. Зерницкая ; под ред. А. В. Матвеева. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 303 с.
17. Курзо, Б. В. Закономерности формирования и проблемы использования сапропеля / Б. В. Курзо ; под науч. ред. Н. Н. Бамбалова. – Минск : Белорусская наука, 2005. – 224 с.
18. Кухарчик, Т. И. Верховые болота Беларуси: трансформация, проблемы использования / Т. И. Кухарчик ; под ред. Н. Н. Бамбалова. – Минск : Навука і тэхніка, 1996. – 135 с.
19. Лиштван, И. И. Торфяные ресурсы и их использование / И. И. Лиштван // Природные ресурсы. – 1996. – № 1. – С. 62–93.
20. Лопотко, М. З. Озера и сапропель / М. З. Лопотко ; под ред. И. И. Лиштвана. – Минск : Наука и техника, 1978. – 88 с.
21. Матвеев, А. В. История формирования рельефа Белоруссии / А. В. Матвеев ; под ред. О. Ф. Якушко. – Минск : Навука і тэхніка, 1990. – 143 с.
22. Ракович, В. А. Классификация функций болот в природе и обществе / В. А. Ракович, Н. Н. Бамбалов // Природные ресурсы. – 1996. – № 1. – С. 119–124.
23. Скоропанов, С. Г. Избранные труды / С. Г. Скоропанов ; под ред. В. Г. Гусакова. – Минск : Беларуская навука, 2010. – 468 с.
24. Тановицкий, И. Г. Антропогенные изменения торфяно-болотных комплексов / И. Г. Тановицкий, Ю. М. Обуховский ; под ред. Н. Н. Бамбалова. – Минск : Наука и техника, 1988. – 164 с.
25. Болысов, С. И. Биогенное рельефообразование на суше : в 2 т. / С. И. Болысов. – М. : ГЕОС, 2006–2007.
26. Васильев, С. В. Лесные и болотные ландшафты Западной Сибири / С. В. Васильев. – Томск : Изд-во НТЛ, 2007. – 276 с.

27. Инишева, Л. И. Болотоведение : учеб. для вузов / Л. И. Инишева.– Томск : ТГПУ, 2009. – 210 с.
28. Кац, Н. Я. Болота земного шара / Н. Я. Кац. – М. : Наука, 1971. – 295 с.
29. Косов, В. И. Торфяно-болотные системы в экосфере (интеграция техносферы с биогеосферой) / В. И. Косов, В. В. Панов. – Тверь : ТГТУ, 2001. – 188 с.
30. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О. Л. Лисс [и др.] ; под ред. В. Б. Куваева. – Тула : Гриф и К°, 2001. – 584 с.
31. Пьявченко, Н. И. Торфяные болота, их природное и хозяйственное значение / Н. И. Пьявченко. – М. : Наука, 1985. – 152 с.
32. Сукачев, В. Н. Избранные труды : в 3 т. / В. Н. Сукачев ; под общ. ред. Е. М. Лавренко. – Л. : Наука, 1972–1975. – Л. : Наука, 1973. – Т. 2 : Проблемы болотоведения, палеоботаники и палеогеографии / В. Н. Сукачев ; редкол.: М. С. Боч, Н. И. Пьявченко (отв. ред.) [и др.]. – 352 с.
33. Телицын, В. Л. Техногенная эволюция и оптимальное использование почв болотных систем / В. Л. Телицын ; отв. ред. В. П. Мельников. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. – 264 с.
34. Телицын, В. Л. Гидроморфные и полугидроморфные почвы геосистем Западной Сибири и их рациональное использование / В. Л. Телицын, А. А. Ваймер ; отв. ред. Л. Н. Скипин. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. – 230 с.
35. Ilnicki, P. Torfowiska i torf / P. Ilnicki. – Poznań : Wydawn. Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu, 2002. – 606 s.
36. Lindsay, R. Bogs: the ecology, classification and conservation of ombrotrophic mires / R. Lindsay. – Perth : Scottish Natural Heritage, 1995. – 120 p.
37. Ломтадзе, В. Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика / В. Д. Ломтадзе. – М. : Недра, 1977. – 416 с.
38. Инженерная геология России / под общ. ред. В. Т. Трофимова. – М. : КДУ, 2011– . – Т. 2 : Инженерная геодинамика территории России / В. Т. Трофимов [и др.] ; под ред. В. Т. Трофимова, Э. В. Калинина. – 2013. – 816 с.
39. Бондарик, Г. К. Инженерная геодинамика : учебник / Г. К. Бондарик, В. В. Пендин, Л. А. Ярг. – М. : КДУ, 2018. – 472 с.
40. Лундин, К. П. Водные свойства торфяной залежи / К. П. Лундин. – Минск : Урожай, 1964. – 212 с.
41. Иванов, К. Е. Водообмен в болотных ландшафтах / К. Е. Иванов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1975. – 280 с.
42. Природа Беларуси на рубеже тысячелетий / В. М. Байчоров [и др.] ; редкол.: А. А. Коваленя [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 367 с.
43. Торфяной фонд Белорусской ССР: по состоянию разведанности на 1 января 1953 года / редкол.: А. С. Оленин (отв. ред.) [и др.]. – М. : [б. и.], 1953. – 805 с.
44. Зайдельман, Ф. Р. Естественное и антропогенное переувлажнение почв: деградация, использование и охрана / Ф. Р. Зайдельман. – СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. – 288 с.
45. Курзо, Б. В. Сапропель / Б. В. Курзо // Полезные ископаемые Беларуси: к 75-летию БелНИГРИ / редкол.: П. З. Хомич, С. П. Гудак, А. М. Синичка (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2002. – С. 305–316.
46. Островский, В. Н. Изменение геологической среды под влиянием животного мира / В. Н. Островский // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2011. – № 1. – С. 26–30.
47. Почвы Республики Беларусь / В. В. Лапа [и др.] ; под ред. В. В. Лапы. – Минск : ИВЦ Минфина, 2019. – 632 с.

### References

1. Bakhteev F. Ya. *Znachenie torfa v narodnom khozyaistve BSSR* [The value of peat in the national economy of the BSSR]. *Torf i ego ispol'zovanie v narodnom khozyaistve : trudy aprel'skoi sessii 1934 g. Belorusskoi Akademii Nauk = Peat and its consumption in the national economy : proceedings of the April session of 1934 of the Belarusian Academy of Sciences*, 1935, pp. 15–44. (in Russian)
2. Dokturovskii V. S. *Bolota, stroenie i razvitiye ikh* [Bogs, their structure and development]. Bendery, 1915, 68 p. (in Russian)
3. Dubakh A. D. *Gidrologiya bolot* [Hydrology of the swamps]. Sverdlovsk, Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1944, 227 p. (in Russian)
4. Zhilinskii I. I. *Ocherk rabot Zapadnoi ekspeditsii po osusheniyu bolot (1873–1898)* [Essay on the work of the Western expedition to drain the swamps (1873–1898)]. Saint Petersburg, 1899, 744 p. (in Russian)
5. Kozlov N. S. *Problema sapropelei v BSSR* [The problem of sapropels in the BSSR]. *Torf i ego ispol'zovanie v narodnom khozyaistve : trudy aprel'skoi sessii 1934 g. Belorusskoi Akademii Nauk = Peat and its consumption in the national economy : proceedings of the April session of 1934 of the Belarusian Academy of Sciences*, 1935, pp. 293–303. (in Russian)
6. Lupinovich I. S., Golub T. F. *Torfyano-bolotnye pochvy BSSR i ikh plodorodie* [Peat-bog soils of the BSSR and their fertility]. Minsk, Akademiya nauk BSSR Publ., 1958, 315 p. (in Russian)
7. Pidoplichko A. P. *Torfyanye mestorozhdeniya Belorussii: genezis, stratigrafiya i raionirovanie* [Peat deposits of Belarus: genesis, stratigraphy and zoning]. Minsk, Akademiya nauk BSSR Publ., 1961, 192 p. (in Russian)
8. Pidoplichko A. P. *Ozernye otlozheniya Belorusskoi SSR* [Lacustrine deposits of the Byelorussian SSR]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975, 117 p. (in Russian)
9. Tyuremnov S. N. *Istoriya razvitiya torfyanikov BSSR v poslelednikovoe vremya: sbornik nauchnykh trudov* [The history of the development of peatlands of the BSSR in the post-glacial period: Collection of scientific works]. Institut torfa AN BSSR, 1951, issue I, pp. 88–111. (in Russian)
10. Tyuremnov S. N. *Torfyanye mestorozhdeniya* [Peat deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1976, 488 p. (in Russian)
11. Bambalov N. N., Dubovets A. G., Belen'kii S. G. *Bolotoobrazovatel'nye protsessy na territorii Belorussii* [Bog-forming processes on the territory of Belarus]. *Problemy Poles'ya = Problems of Polesie*, 1990, issue 13, pp. 75–90. (in Russian)
12. Bambalov N. N., Rakovich V. A. *Rol' bolot v biosfere* [The role of swamps in the biosphere]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2005, 285 p. (in Russian)

13. Bambalov N. N. *Ob otlichiyakh bolot ot zabolochnykh zemei'* [Distinctions between mires and waterlogged lands]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2009, no. 2, pp. 20–25. (in Russian)
14. Galkin A. N., Matveev A. V., Pavlovskii A. I., Sanko A. F. *Inzhenernaya geologiya Belarusi. Inzhenernaya geodinamika Belarusi* [Engineering geology of Belarus. Engineering geodynamics of Belarus]. Vitebsk, VSU Publ., 2017, 452 p. (in Russian)
15. Grechanik N. F. *Biogenische formy rel'efa : uchebno-metodicheskoe posobie* [Biogenic landforms : teaching aid]. Brest, BrGU Publ., 2016, 89 p. (in Russian)
16. Zernitskaya V. P. *Pozdnelednikov'e i golotsen Belarusi: geokhronologiya, osadkonakoplenie, rastitel'nost' i klimat* [Late Glacial and Holocene of Belarus: geochronology, sedimentation, vegetation and climate]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2022, 303 p. (in Russian)
17. Kurzo B. V. *Zakonomernosti formirovaniya i problemy ispol'zovaniya sapropelya* [Patterns of formation and problems of using sapropel]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2005, 224 p. (in Russian)
18. Kukharchik T. I. *Verkhovye bolota Belarusi: transformatsiya, problemy ispol'zovaniya* [Raised swamps of Belarus: transformation, problems of use]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1996, 135 p. (in Russian)
19. Lishtvan I. I. *Torfyanye resursy i ikh ispol'zovanie* [Peat resources and their use]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 1996, no. 1, pp. 62–93. (in Russian)
20. Lopotko M. Z. *Ozera i sapropel'* [Lakes and sapropel]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1978, 88 p. (in Russian)
21. Matveev A. V. *Istoriya formirovaniya rel'efa Belorussii* [The history of the formation of the relief of Belarus]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1990, 143 p. (in Russian)
22. Rakovich V. A., Bambalov N. N. *Klassifikatsiya funktsii bolot v prirode i obshchestve* [Classification of swamp functions in nature and society]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 1996, no. 1, pp. 119–124. (in Russian)
23. Skoropanov S. G. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010, 468 p. (in Russian)
24. Tanovitskii I. G. *Antropogennye izmeneniya torfyano-bolotnykh kompleksov* [Anthropogenic changes in peat-bog complexes]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1988, 164 p. (in Russian)
25. Bolysov S. I. *Biogennoe rel'efoobrazovanie na sushe : v 2 t.* [Biogenic relief formation on land : in 2 vols]. Moscow, GEOS Publ., 2006–2007. (in Russian)
26. Vasil'ev S. V. *Lesnye i bolotnye landshafty Zapadnoi Sibiri* [Forests and wetlands of West Siberia]. Tomsk, NTL Publ., 2007, 276 p. (in Russian)
27. Inisheva L. I. *Bolotovedenie : uchebnik dlya vuzov* [Bolotology : a textbook for universities]. Tomsk, TGPU Publ., 2009, 210 p. (in Russian)
28. Kats N. Ya. *Bolota zemnogo shara* [Swamps of the globe]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 295 p. (in Russian)
29. Kosov V. I. *Torfyano-bolotnye sistemy v ekosfere (integratsiya tekhnosfery s biogeosferoi)* [Peat-bog systems in the eco-sphere (integration of the technosphere with the biogeosphere)]. Tver', TGTU Publ., 2001, 188 p. (in Russian)
30. Liss O. L. et al. *Bolotnye sistemy Zapadnoi Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog systems of Western Siberia and their environmental significance]. V. B. Kuvaev (ed.). Tula, Grif i K° Publ., 2001, 584 p. (in Russian)
31. P'yavchenko N. I. *Torfyanye bolota, ikh prirodnoe i khozyaistvennoe znachenie* [Peat bogs, their natural and economic importance]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 152 p. (in Russian)
32. Sukachev V. N. *Izbrannye trudy : v 3 t. T. 2 : Problemy bolotovedeniya, paleobotaniki i paleogeografi* [Selected works : in 3 vols. Vol. 2 : Problems of swamp science, paleobotany and paleogeography]. Leningrad, Nauka Publ., 1973, 352 p. (in Russian)
33. Telitsyn V. L. *Tekhnogennaya evolyutsiya i optimal'noe ispol'zovanie pochv bolotnykh sistem* [Technogenic evolution and optimal use of soils of bog systems]. V. P. Mel'nikov (ed.). Novosibirsk, SO RAN Publ., 2004, 264 p. (in Russian)
34. Telitsyn V. L., Vaimer A. A. *Gidromorfnye i polugidromorfnye pochyvy geosistem Zapadnoi Sibiri i ikh ratsional'noe ispol'zovanie* [Hydromorphic and semihydromorphic soils of geosystems of Western Siberia and their rational use]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2005, 230 p. (in Russian)
35. Ilnicki P. *Torfowiska i torf* [Peatlands and peat]. Poznań, Publishing House of the Agricultural University named August Cieszkowski, 2002, 606 p. (in Polish)
36. Lindsay R. Bogs: the ecology, classification and conservation of ombrotrophic mires. Perth, Scottish Natural Heritage, 1995, 120 p.
37. Lomtadze V. D. *Inzhenernaya geologiya. Inzhenernaya geodinamika* [Engineering geology. Engineering geodynamics]. Moscow, Nedra Publ., 1977, 416 p. (in Russian)
38. Trofimov V. T. et al. (eds.). *Inzhenernaya geologiya Rossii. Inzhenernaya geodinamika territorii Rossii* [Engineering geology of Russia. T. 2. Engineering geodynamics of the territory of Russia]. Moscow, KDU Publ., 2013, 816 p. (in Russian)
39. Bondarik G. K., Pendin V. V., Yarg L. A. *Inzhenernaya geodinamika* [Engineering geodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2018, 472 p. (in Russian)
40. Lundin K. P. *Vodnye svoistva torfyanoi zalezhi* [Water properties of peat deposits]. Minsk, Urozhai Publ., 1964, 212 p. (in Russian)
41. Ivanov K. E. *Vodoobmen v bolotnykh landshaftakh* [Water exchange in marsh landscapes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 280 p. (in Russian)
42. Baichorov V. M. et al. *Priroda Belarusi na rubezhe tysyacheletii* [Nature of Belarus at the turn of the millennium]. A. A. Kovalenya et. al. (eds.). Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2020, 367 p. (in Russian)
43. Olenin A. S. et al. (eds.). *Torfyanoj fond Belorusskoi SSR: po sostoyaniyu razvedannosti na 1 yanvarya 1953 goda* [Peat fund of the Byelorussian SSR: as of exploration as of January 1, 1953]. Moscow, 1953, 805 p. (in Russian)
44. Zaidel'man F. R. *Estestvennoe i antropogennoe pereuvlazhenie pochv: degradatsiya, ispol'zovanie i okhrana* [Natural and anthropogenic waterlogging of soils: degradation, use and protection]. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992, 288 p. (in Russian)
45. Kurzo B. V. *Sapropel'* [Sapropel]. *Poleznye iskopaemye Belarusi: k 75-letiyu BelNIGRI* [Minerals of Belarus: to the 75th anniversary of BelNIGRI]. Minsk, Adukatsya i vykhavanne Publ., 2002, pp. 305–316. (in Russian)

46. Ostrovskii V. N. *Izmenenie geologicheskoi sredy pod vliyaniem zhivotnogo mira* [Changes in the geological environment under the influence of the animal world]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya = Geo-ecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2011, no. 1, pp. 26–30. (in Russian)
47. Lapa V. V. et al. (ed.). *Pochvy Respubliki Belarus'* [Soils of the Republic of Belarus]. Minsk, IVTs Minfina Publ., 2019, 632 p. (in Russian)

**Информация об авторе**

Кухарик Евгений Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией современной геодинамики и палеогеографии, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь).  
E-mail: shzhk@mail.ru

**Information about the author**

Evgeniy A. Kukharik – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of Modern Geodynamics and Paleogeography, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: shzhk@mail.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-2-195-212>  
УДК 556.38(476.7)

Поступила в редакцию 03.10.2022  
Received 03.10.2022

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ГРУНТОВЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД (НА ПРИМЕРЕ НОВОДВОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАЗАЛЬТОВ)

В. Г. Жогло

*Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Предложен новый методический подход к количественной оценке взаимосвязи грунтовых и поверхностных вод, заключающийся в использовании цифровой карты рельефа и гидрографической сети моделируемой области для построения карты гидроизогипс и оценки интенсивности инфильтрационного питания грунтовых вод. Данна краткая характеристика численной геофильтрационной модели подземных вод Новодворского месторождения базальтов и сопутствующих туфов. Изложена технология реализации на модели поверхностных водоемов и водотоков. В пределах моделируемой области оценены естественные ресурсы подземных вод, величина которых расчлена на подземный сток в реки и разгрузку грунтовых вод испарением. По результатам моделирования естественной фильтрации подземных вод оценена структура баланса подземных и поверхностных вод, построены карты гидроизогипс, глубин залегания и интенсивности инфильтрационного питания грунтовых вод.

**Ключевые слова:** Новодворское месторождение базальтов; рельеф; гидрография; водный баланс; инфильтрационное питание; численное моделирование; коэффициент регуляризации.

**Для цитирования.** Жогло В. Г. Численное моделирование взаимосвязи грунтовых и поверхностных вод (на примере Новодворского месторождения базальтов) // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 195–212.

## NUMERICAL MODELING OF THE RELATIONSHIP BETWEEN GROUND AND SURFACE WATERS (ON THE EXAMPLE OF THE NOVODVORSKOYE BASALT DEPOSIT)

V. G. Zhoglo

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** A new methodological approach to the computational assessment of the interconnection between soils and water pollution is proposed, which consists in a set of digital relief maps and a hydrographic network for compiling hydroisogypse maps and infiltration coefficients of groundwater recharge. A brief description of the numerical geofiltration model of groundwater of the Novodvorskoye deposit of basalts and accompanying tuffs is given. The technology of implementation on the model of surface reservoirs and watercourses is presented. Within the simulated area, the natural resources of groundwater are estimated, the value of which is divided into groundwater runoff into rivers and groundwater discharge by evaporation. Based on the results of modeling the natural filtration of groundwater, the structure of the balance of groundwater and surface water was assessed, maps of hydroisohyps, depths of occurrence and intensity of infiltration recharge of groundwater were constructed.

**Keywords:** Novodvorskoye basalt deposit; relief; hydrography; water balance; infiltration nutrition; numerical simulation; regularization coefficient.

**For citation.** Zhoglo V. G. Numerical modeling of the relationship between ground and surface waters (on the example of the Novodvorskoye basalt deposit). *Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 195–212.

**Введение.** В результате совместно выполненных геологоразведочных и научно-исследовательских работ в составе Государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов в 2016–2020 годах» Государственным предприятием «НПЦ по геологии» в пределах Пинской перспективной площади (ППП) Пинского района Брестской области открыто месторождение Новодворское – первое в Республике Беларусь месторождение базальтов и сопутствующих базальтовых туфов. Установлено, что базальты и базальтовые туфы Новодворского месторождения пригодны в качестве сырья для производства базальтового волокна, стекол, стеклокристаллических

и керамических материалов, а также пористых заполнителей, широко используемых в промышленном и гражданском строительстве. Организация промышленной разработки месторождения базальтов позволит расширить минерально-сырьевую базу республики, внести весомый вклад в решение актуальных вопросов импортозамещения и ресурсосбережения.

Эффективность разработки Новодворского месторождения в значительной степени зависит от гидрогеологических условий ППП и их изменения в процессе ведения горных работ. Для решения разнообразных гидрогеологических задач, связанных с освоением Новодворского месторождения базальтов, в Институте природопользования НАН Беларусь по договору с ГП «НПЦ по геологии» создана региональная численная геофiltрационная модель (ЧГФМ) водосбора карьерных полей ППП (автор разработки – В. Г. Жогло).

Под геофiltрационной (гидродинамической) моделью потока подземных вод понимается совокупность дифференциальных уравнений, описывающих процесс фильтрации подземных вод, а также условия однозначности, состоящие из начальных и граничных условий процесса. Численные модели фильтрации подземных вод представляют собой геофiltрационные модели гидрогеологических объектов, реализованные на ЭВМ на основе специальных вычислительных программ [1].

Исходной основой для численного моделирования является сеточная модель геофiltрационного потока, формируемая на базе сеточной схемы потока, которая получается заданием в области потока системы узловых точек с относящимися к ним элементами (блоками) потока и последующей реализацией сеточной схемы в виде системы конечно-разностных уравнений (рис. 1). Считая, что суммарное поступление воды в блок за время  $\Delta t$  компенсируется изменением объема воды в блоке  $\Delta V$ , для планового нестационарного потока применительно к наиболее распространенной прямоугольной сетке, ориентированной по осям  $X$  и  $Y$ , при задании границ блоков посередине между узловыми точками (см. рис. 1) балансовое уравнение имеет вид [1]:

$$Q_{i-1} + Q_{i+1} + Q_{j-1} + Q_{j+1} + Q_w + Q_b + Q_c = \Delta V / \Delta t, \quad (1)$$

где  $Q_{i-1} + Q_{i+1} + Q_{j-1} + Q_{j+1}$  – расходы потоков, поступающих в расчетный блок из соседних блоков соответствующего номера;  $Q_w = w\Delta X \Delta Y$ , где  $w$  – модуль (интенсивность) площадного питания;  $Q_b$  – расход, поступающий из водотоков, и водоотбор из скважин с расходом  $Q_c$ .

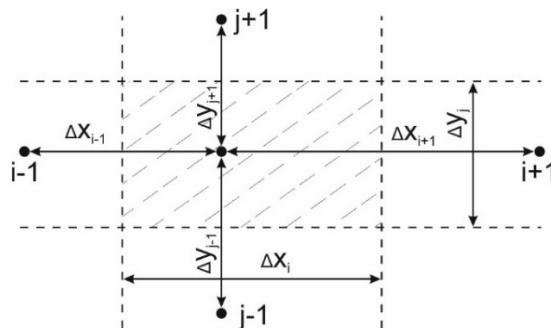


Рис. 1. Сетка плоского потока [1]

Fig. 1. The network of plain stream [1]

Одной из наиболее сложных задач построения математических (численных) моделей фильтрации подземных вод (геофилтрации) является реализация взаимосвязи подземных и поверхностных вод [1–3]. Для многих типов гидрогеологических задач, особенно геоэкологической направленности, в которых геофилтратационные расчеты выполняются в стационарной (квазистационарной) постановке, вполне достаточно рассматривать поверхностные водоемы и водотоки в качестве границ гидрогеологических объектов, не раскрывая динамику их водного баланса. Взаимосвязь грунтовых вод (ГВ) с атмосферой через зону аэрации осуществляется заданием инфильтрационного питания. В такой постановке задача сводится к математической модели геофилтрации, верхней границей которой является уровенная поверхность грунтового водоносного горизонта (ГВГ), получающего инфильтрационное питание сверху и имеющего гидравлическую связь с поверхностными водоемами и водотоками, на которых задаются известные граничные условия. Следует отметить, что в наиболее общем случае в математических моделях взаимосвязи подземных и поверхностных вод должна учитываться динамика как

поверхностного, так и подземного стока, поскольку они являются тесно связанными компонентами гидрологического цикла.

**1. Методы исследования.** Региональная ЧГФМ водосбора карьерных полей ППП (рабочее название модели – Reg00baz) создана на базе лицензионного программного обеспечения (ПО) ModTech ЗАО «Геолинк» (вычислительная программа – GWFS, разработчик – А. А. Рошаль, г. Москва). Система управления качеством разработки ПО ЗАО «Геолинк Консалтинг» в 2002 г. сертифицирована на соответствие требованиям международного стандарта ISO 9001:2000. Программа GWFS (Ground Water Flow Simulation – моделирование фильтрации подземных вод) предназначена для решения гидрогеологических (геоэкологических) задач, связанных с анализом и прогнозом движения подземных вод. Она позволяет осуществлять моделирование стационарных и нестационарных задач геофильтрации в многослойных и квазирехмерных изотропных и анизотропных в плане системах. Фильтрация подземных вод в анизотропном проницаемом слое описывается в декартовой системе координат следующим дифференциальным уравнением [4]:

$$\mu(x, y) \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ T_x(x, y) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ T_y(x, y) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + A_b(x, y)(H - H_b) + A_h(x, y)(H - H_h) + q(x, y), \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент упругой (для напорного слоя) или гравитационной (для безнапорного слоя) водотдачи (при переменном напорно-безнапорном режиме фильтрации принимает соответствующее значение в зависимости от положения уровня по отношению к отметке кровли слоя);  $x$  и  $y$  – линейные координаты;  $H$ ,  $H_b$  и  $H_h$  – абсолютные (или относительные) отметки уровней подземных вод расчетного, выше- и нижележащего проницаемых слоев соответственно;  $t$  – текущее время;  $T_x$  и  $T_y$  – проводимости проницаемого слоя вдоль осей  $X$  и  $Y$  соответственно (для изотропного слоя эти значения совпадают);  $A_b$  и  $A_h$  – коэффициенты перетекания через выше- и нижележащий слабопроницаемые слои соответственно;  $q(x, y)$  – интенсивность площадных и точечных источников (стоков).

В случае безнапорной фильтрации, когда справедлива схема однородного слоя, плановая проводимость проницаемого слоя пропорциональна его мощности. При стационарной фильтрации левая часть уравнения (2) равна нулю. Для решения уравнения (2) в программе GWFS используется метод конечных разностей (метод сеток). С этой целью область моделирования в плане разбивается прямоугольной (в общем случае неравномерной) сеткой с шагами по осям координат  $X$  и  $Y$ , равными

$$\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_{n_x} \text{ и } \Delta Y_1, \Delta Y_2, \dots, \Delta Y_{n_y},$$

где  $n_x$  и  $n_y$  – число шагов по осям  $X$  и  $Y$ . Их максимальное количество определяется лишь техническими возможностями вычислительной техники.

Уравнение (2) в конечных разностях для  $k$ -го слоя (по оси  $Z$ ) и некоторого расчетного блока с координатами  $i$  (по оси  $Y$ ) и  $j$  (по оси  $X$ ) и момента времени  $t$  имеет вид

$$\begin{aligned} & T_t(H_t - H) + T_w(H_w - H) + T_n(H_n - H) + T_e(H_e - H) + \\ & + T_s(H_s - H) + T_b(H_b - H) + T_h(H_h - H) + Q_b = 0, \\ & H = H_{i,j,k}^t, \quad H_t = H_{i,j,k}^{t-\Delta t}, \quad H_w = H_{i,j-1,k}^t, \quad H_n = H_{i-1,j,k}^t, \quad H_e = H_{i,j+1,k}^t, \\ & H_s = H_{i+1,j,k}^t, \quad H_b = H_{i,j-1}^t, \quad H_h = H_{i,j+1}^t, \quad Q_b = Q_{i,j,k}^t, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $T_t$  – временная проводимость;  $T_w$ ,  $T_n$ ,  $T_e$  и  $T_s$  – плановые межблочные проводимости (между расчетным блоком с координатами  $(i, j)$  и соответствующими блоками с координатами  $(i, j-1)$ ,  $(i-1, j)$ ,  $(i, j+1)$  и  $(i+1, j)$ );  $T_b$  и  $T_h$  – вертикальные межблочные проводимости (между расчетным блоком  $k$ -го слоя и соответствующими блоками вышележащего ( $k-1$ ) и нижележащего ( $k+1$ ) слоев);  $Q_b$  – суммарный приток в блок.

Суммарная величина притока в блок определяется выражением

$$Q_b = Q_i + Q_r + Q_p + Q_d + Q_w, \quad Q_w = Q_{w,i,j,k}^t, \quad (4)$$

где  $Q_i$  – инфильтрационное питание или испарение подземных вод;  $Q_r$  – расход подземных вод в поверхностные водотоки или приток воды в пласт из водотоков;  $Q_p$  – дебит источников (родников) подземных вод;  $Q_d$  – приток подземных вод к дренам;  $Q_w$  – дебит нагнетательных или водозаборных

скважин. В выражении (4) первые три слагаемых могут быть заданы только для первого от поверхности водоносного горизонта (расчетного слоя модели), т. е. для  $k = 1$ .

Записав уравнения типа (3) для всех узлов пространственной сетки, получим  $n \times n$  уравнений. Решение такой системы алгебраических уравнений осуществляется итерационным методом по неявной схеме. В программе GWFS использован шахматный алгоритм Чебышева [4]. В последней версии программы добавлены следующие методы: PCG2 (метод сопряженного градиента) © US Geological Survey; SIP (метод неявного решения) © US Geological Survey; SSOR (метод послойной релаксации) © US Geological Survey; LMG (метод множественных сеток) © US Geological Survey.

**2. Методика реализации гидродинамических условий на верхней границе геофильтрационной модели.** Верхней границей ЧГФМ водосбора карьерных полей ППП (модели Reg00baz) является уровенная поверхность ГВ (свободная поверхность потока). Для реальных гидрогеологических объектов она реализуется в форме карты гидроизогипс. Исходные данные для построения таких карт получаются при изучении положения уровня грунтовых вод (УГВ) в скважинах и колодцах, а также выходов ГВ на поверхность Земли (источников).

В соответствии с работой [5] будем полагать, что инфильтрационный водообмен через зону аэрации осуществляется путем инфильтрации атмосферных осадков или испарения ГВ. Алгебраическая сумма интенсивности инфильтрации и испарения с депрессионной поверхности ГВ в каждой расчетной точке за рассматриваемый период представляет собой результирующую величину инфильтрационного питания. Связь ГВ с поверхностными водоемами и водотоками реализуется через подрусловые отложения. Направленность и интенсивность процесса взаимодействия зависит от проницаемости подрусловых отложений и соотношения уровней грунтовых и речных вод.

При воспроизведении на ЧГФМ стационарного (квазистационарного) режима фильтрации подземных вод суммарная величина притока в расчетный блок с водотоком  $Q_{b_{i,j}}$  в программе GWFS определяется выражением (4). Для естественного режима фильтрации  $Q_d$  и  $Q_w$  равны нулю, а родниковый сток  $Q_p$  расходуется на испарение или входит в виде составной части в речной сток, поэтому для рассматриваемого нами случая

$$Q_{b_{i,j}} = Q_{r_{i,j}} + Q_{i_{i,j}}, \quad (5)$$

где  $Q_{r_{i,j}}$  – расход ГВ в поверхностные водотоки или приток воды в пласт из водотоков в пределах расчетного блока модели с координатами  $i, j$ ;  $Q_{i_{i,j}}$  – инфильтрационное питание или испарение ГВ через зону аэрации.

Инфильтрационное питание реализуется на основе зависимости

$$Q_{i_{i,j}} = w_{i,j} \Delta X_i \Delta Y_j, \quad (6)$$

где  $w_{i,j}$  – интенсивность инфильтрационного питания в пределах расчетного блока модели с координатами  $i, j$ ;  $\Delta X_i$  и  $\Delta Y_j$  – размеры блока по осям  $X$  и  $Y$  соответственно.

Взаимосвязь ГВ с поверхностными водотоками воспроизводится в соответствии с выражением

$$Q_{r_{i,j}} = T_{r_{i,j}} (H_{r_{i,j}} - H_{i,j}), \quad (7)$$

где  $H_{r_{i,j}}$  и  $H_{i,j}$  – абсолютные отметки уровней воды в реке и ГВГ соответственно;  $T_{r_{i,j}}$  – проводимость подрусловых отложений, причем

$$T_{r_{i,j}} = \chi_{r_{i,j}} N_{r_{i,j}} L_{r_{i,j}}, \quad (8)$$

где  $\chi_{r_{i,j}}$  – коэффициент взаимосвязи водотока с подземными водами  $\chi_{r_{i,j}} = k_{r_{i,j}} / m_{r_{i,j}}$ ;  $k_{r_{i,j}}$  и  $m_{r_{i,j}}$  – коэффициент фильтрации и мощность слабопроницаемых подрусловых отложений соответственно;  $N_{r_{i,j}}$  и  $L_{r_{i,j}}$  – ширина и длина русла реки в пределах расчетного блока модели соответственно.

**3. Объект исследования.** Объектом исследования являются подземные воды ППП. ЧГФМ этого объекта предназначена для моделирования фильтрации подземных вод при различных схемах осушения карьерных полей, прогнозных оценок водопритоков в горные выработки, прогноза уровенного режима и баланса подземных и поверхностных вод на территории ППП.

Размеры изучаемого объекта составляют 66,0 км по оси X (с запада на восток) и 42,0 км по оси Y (с юга на север). В вертикальном разрезе подземные воды приурочены к четвертичным, палеогеновым, меловым, верхнепротерозойским отложениям и породам кристаллического фундамента. Гидрогеологические условия освоения месторождений полезных ископаемых в значительной степени определяются наличием в разрезе непроницаемых и слабопроницаемых слоев, даже если они имеют подчиненное значение в строении обводненной толщи пород. Поэтому воспроизведению слабопроницаемых отложений в структуре геофильтрационной модели уделено особое внимание.

По материалам предварительной разведки Новодворского месторождения базальтов и сопутствующих туфов на его территории и прилегающих землях ГП «НПЦ по геологии» (В. А. Зубок и В. Б. Дорошенко) выделены слабопроницаемые стратиграфические толщи (комплексы): 1) слабоводоносный днепровский моренный комплекс; 2) слабоводоносный березинский моренный комплекс; 3) пачка алевритов в кровле харьковского горизонта; 4) слабоводоносный киевский терригенный комплекс; 5) весьма слабоводоносная (практически безводная) вулканогенная толща ратайчицкой свиты и малоритского магматического комплекса нижнего венда.

По наличию в разрезе перечисленных выше слабопроницаемых толщ на территории исследуемой территории нами выделены следующие водоносные и слабопроницаемые слои и пласти (сверху вниз):

- 1-й водоносный пласт (1ВП) – водоносный горизонт (комплекс) четвертичных отложений, залегающих на днепровской морене (ГВГ);
- 1-й разделяющий слой (1РС) – слабоводоносный днепровский моренный комплекс;
- 2-й водоносный слой (2ВС) – водоносный березинский-днепровский водно-ледниковый комплекс;
- 2-й разделяющий пласт (2РП) – отложения березинского моренного комплекса и пачка алевритов в кровле харьковского горизонта;
- 3-й водоносный слой (3ВС) – водоносный харьковский терригенный комплекс;
- 3-й разделяющий слой (3РС) – слабоводоносный (слабопроницаемый) киевский терригенный комплекс;
- 4-й водоносный слой (4ВС) – верхнемеловой терригенно-карбонатный комплекс.
- 4-й разделяющий слой (4РС) – весьма слабоводоносная вулканогенная толща ратайчицкой свиты и малоритского магматического комплекса нижнего венда.
- 5-й водоносный пласт (5ВП) – пинские отложения рифея и зона трещиноватости архейских нижнепротерозойских магматических и метаморфических пород (пинский водоносный горизонт).

1-й водоносный слой – ГВГ. Включает отложения, залегающие на днепровской морене: слабоводоносный голоценовый болотный горизонт и водоносный поозерский озерно-аллювиальный комплекс.

Голоценовый болотный горизонт имеет ограниченное распространение. Водовмещающие породы представлены торфом различной степени разложения и супесью гумусированной, мощность которых составляет 0,30–1,95 м. По данным геолого-съемочных работ глубина залегания УГВ не превышает 0,5–0,6 м. Коэффициент фильтрации, определенный по результатам откачки, равен 0,08 м/сут.

Водоносный поозерский озерно-аллювиальный комплекс имеет повсеместное распространение, залегает с поверхности или под слоем болотных осадков. Водовмещающие породы представлены песками разнозернистыми, преимущественно мелкозернистыми, полевошпатово-кварцевыми, с включением гравия. Их мощность изменяется от 6,5 до 25,0 м, преобладают значения 15,0–20,0 м. Воды горизонта беззапорные. Глубина залегания уровней – 0,5–3,0 м, по данным обследования колодца в д. Новый Двор – 2,3 м. Коэффициенты фильтрации, определенные по результатам опытных откаек, варьируют от 3,5 до 6,0 м/сут. Взяв за основу имеющиеся данные, на геофильтрационной модели Reg00baz коэффициент водопроводимости 1-го ВС принят равным 85 м<sup>2</sup>/сут.

1-й разделяющий слой – слабоводоносный днепровский моренный комплекс. На ППП днепровские моренные отложения распространены фрагментарно. Их мощность в пределах месторождения Новодворское изменяется от 0,6 до 13,7 м. Моренные отложения представлены песком полевошпатово-кварцевым, разнозернистым, с включением гравия и гальки кварца, гранита и карбонатных пород. Фильтрационные свойства днепровской морены на территории Новодворского месторождения не изучались. Коэффициенты фильтрации моренных образований, определенные Белорусской гидрогеологической экспедицией в лабораторных условиях на приборе «Большой монолит» по образцам пород, отобранным на участке Уза (район Гомеля), изменяются от 0,0003 до 0,1 м/сут. По данным машинной обработки геофизических исследований скважин на территории юго-востока Беларуси (А. В. Беляшов, 1991) коэффициент перетока днепровской морены изменяется от 0,02 до 0,0002 1/сут (среднее значение – 0,003 1/сут). Близкие результаты получены по району Гомельского химзавода [6]: коэффициент перетока, определенный методом математического моделирования по материалам длительных режимных наблюдений, равен 0,00014–0,0036 1/сут (среднее значение – 0,0011 1/сут). На модели Reg00baz значение коэффициента перетока днепровской морены, учитывая ее опесченность, принято равным 0,01 1/сут.

**2-й водоносный слой** – водоносный березинский-днепровский водно-ледниковый комплекс. Распространен локально в северо-западной части территории исследований, отсутствуя в ее северо-восточной и юго-восточной частях. Мощность отложений колеблется от 1,8 до 35,5 м и в основном составляет 6,0–10,0 м. Водовмещающие породы представлены песками, преимущественно крупно- и среднезернистыми, гравелистыми, полевошпатово-кварцевыми, с включением гравия, иногда слабоглинистыми, с прослойями супесей, суглинков и глин мощностью до 5,2 м.

Днепровская морена, залегающая в кровле водоносного березинского-днепровского водно-ледникового комплекса, имеет небольшую мощность и сложена в основном песками разнозернистыми, песчано-гравийным и гравийно-галечным материалом, в северной части участка месторождения полностью размыта, а в кровле березинского-днепровского водоносного комплекса залегает поозерский озерно-аллювиальный комплекс, с которым они образуют единую водоносную толщу. По условиям залегания воды комплекса безнапорные. Уровни устанавливаются на глубинах 1,65 – 5,0 м.

Объединенный плейстоценовый водоносный комплекс (ОПВК) распространен повсеместно и объединяет несколько горизонтов различного возраста и генезиса – в основном это поозерские озерно-аллювиальные отложения, залегающие с поверхности, днепровская морена, березинские-днепровские водоно-ледниковые отложения, залегающие на породах палеогена. Суммарная мощность плейстоцена в пределах участка месторождения изменяется от 19,0 до 30,9 м и в среднем составляет 23,6 м. Водовмещающими породами являются разнозернистые, преимущественно мелкозернистые, реже – средне-крупнозернистые пески. Моренные отложения представлены песками разнозернистыми, с включением гравия и гальки.

Уровни подземных вод ОПВК залегают на глубине 1,65–2,53 м. Положение зеркала ГВ находится на отметке 135,43 м. Коэффициент фильтрации, определенный графоаналитическим методом по данным опытной кустовой откачки из скважины 2г, изменяется от 19 до 24 м/сут, в среднем составляя 22 м/сут. На основании этих данных среднее значение водопроводимости ОПВК  $km = k \cdot t = 22,0 \cdot 23,6 = 519,2$  ( $m^2$ /сут). Оно характеризует суммарную водопроводимость ( $km = km_1 + km_2$ ) 1-го и 2-го ВС геофильтрационной модели Reg00baz. Так как для 1-го ВС  $km_1 = 85,0$   $m^2$ /сут, то для 2-го ВС  $km_2 = 519,2 - 85,0 = 434,2$  ( $m^2$ /сут). Это значение и принято в модели Reg00baz.

**2-й разделяющий пласт.** Объединяет отложения березинского моренного комплекса и пачку алевритов в кровле харьковского горизонта. Слой конечно-моренных валунно-галечно-песчаных отложений мощностью 1,0–6,4 м вскрыт в западной части участка работ на глубине 19,3–20,0 м. Он подстилается верхней пачкой харьковского горизонта, сложенной слабослюдистыми глауконитово-кварцевыми алевритами мощностью от 8,3 до 19,8 м. Фильтрационные свойства 2-го РП на территории Новодворского месторождения не изучались. Проницаемость алевритов палеогена в направлении, перпендикулярном напластованию пород, детально изучена в районе Гомельского химического завода [6]. Коэффициент перетока, определенный методом математического моделирования по материалам длительных режимных наблюдений, изменяется от 0,00001 до 0,00033 1/сут. Его среднее значение, равное 0,0001 1/сут, использовано в модели Reg00baz.

**3-й водоносный слой** – водоносный харьковский терригенный комплекс. Распространен почти повсеместно. Отсутствует лишь в северо-восточной части района исследований. Водовмещающие породы представлены песками разнозернистыми, среднезернистыми, реже – крупно-среднезернистыми, глауконитово-кварцевыми, слюдистыми, с прослойями алевритов. Мощность песчаной пачки изменяется от 3,1 до 15,0 м. По данным опытно-фильтрационных работ коэффициент водопроводимости колеблется от 40 до 75  $m^2$ /сут и в среднем составляет 59,0  $m^2$ /сут. Это значение и принято в исходной геофильтрационной модели Reg00baz.

**3-й разделяющий слой** – слабопроницаемый (слабоводоносный) киевский терригенный комплекс. Распространен повсеместно. Представлен комплекс слюдистыми глауконитово-кварцевыми алевролитами, в меньшей степени – тонкозернистыми песчаниками, песками мелко-среднезернистыми, алевритистыми. Мощность отложений варьирует от 3,1 до 15,4 м, локально увеличиваясь в понижениях палеорельефа. Фильтрационные свойства киевских отложений на территории Новодворского месторождения не изучались. По аналогии со 2-м РС коэффициент перетока алевритов киевского горизонта принят равным 0,0001 1/сут.

**4-й водоносный слой** – верхнемеловой терригенно-карбонатный комплекс. Слабоводоносный верхнемеловой комплекс широко распространен на территории района исследований, но в пределах подсчетных блоков полезного ископаемого практически отсутствует. Залегает на глубине от 43,4 до 61,6 м. Водовмещающие породы представлены мелом, иногда мергелистым, мощностью от 1,9 до 28,2 м, в нижней части – песками глауконитово-кварцевыми мощностью от 0,3 до 4,8 м. Отложения в различной степени трещиноваты, и к ним приурочены пластово-трещинные воды напорного типа. К югу от Новодворского месторождения, в районе г. Пинска, отмечается резкое увеличение водобильности туронских отложений верхнего мела. Коэффициент водопроводимости толщи колеблется от 1,7 до 255  $m^2$ /сут, причем наибольшая его величина отмечена в районе водозабора Пина-1.

Из-за существенного увеличения водообильности верхнемелового терригенно-карбонатного комплекса от участка месторождения в направлении рек Припяти и Пины на геофiltрационной модели Reg00baz коэффициент водопроводимости 4-го ВС от северной границы моделируемой области до середины Новодворского месторождения базальтов задается постоянным и равным  $5,0 \text{ м}^2/\text{сут}$ . В южном направлении происходит равномерное увеличение  $k_{t4}$  от  $5,0 \text{ м}^2/\text{сут}$  в средней части модели до  $k_{t4} = 255,0 \text{ м}^2/\text{сут}$  в долинах рек Припяти и Пины.

**4-й разделяющий слой** – почти безводная вулканогенная толща ратайчицкой свиты и малоритского магматического комплекса нижнего венда. Верхняя часть ратайчицкого терригенно-эффузивного комплекса сложена базальтами толеитовыми и долеритами. По результатам лабораторных исследований пористость базальтов в естественных условиях составляет 2,3–3,3 %, естественная влажность – 0,9–3,2 %, что подтверждает заключение, полученное по результатам геофизических исследований о безводности базальтов. Средняя мощность толщи в пределах блоков подсчета запасов Новодворского месторождения по категориям  $C_1 + C_2$  равна 71,1 м. На основе общих сведений о вертикальной проницаемости безводных (весыма слабоводоносных) вулканогенных отложений в геофiltрационной модели Reg00baz коэффициент перетока 4-го РС задан равным 0,00001 1/сут. Скорее всего, это несколько завышенное значение. Его уточнение будет производиться в процессе калибрации модели и по мере поступления новых материалов.

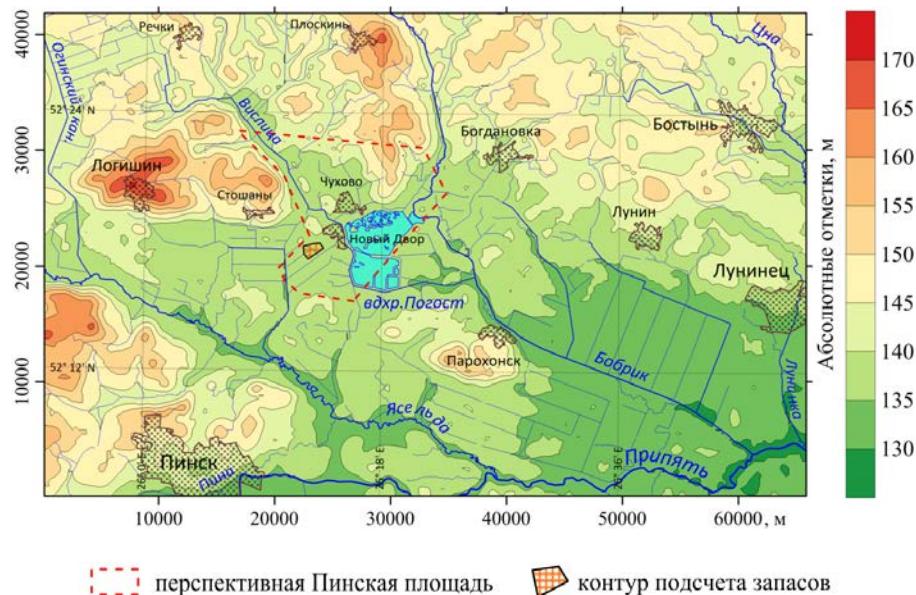
**5-й водоносный пласт** – пинские отложения рифея и зона трещиноватости архейских-нижне-протерозойских магматических и метаморфических пород (пинский водоносный горизонт). Водоносный ратайчицкий терригенно-эффузивный комплекс в пределах района месторождения распространен повсеместно. К туфопесчаникам и песчаникам, залегающим под базальтами, приурочены трещинно-поровые воды напорного типа. Под ратайчицкими отложениями распространены разнозернистые песчаники горбашевской свиты, общая мощность которых изменяется в пределах 3,0–17,0 м. Песчаники массивные, часто переходящие в рыхлые. Информации о водообильности данных отложений в пределах района Новодворского месторождения нет. Пинские отложения рифея вскрыты на глубине 134,0 м. Водовмещающие породы представлены песчаниками от тонко- до крупнозернистых, преимущественно мелко-зернистыми, на железистом, известковистом, реже – глинистом цементе, а также туфогенно-осадочными породами. К ним приурочены трещинно-поровые воды. На участке месторождения они опробованы совместно с песчаниками пинских отложений рифея опытной одиночной откачкой из разведочной гидрогеологической скважины 1г. Интервал опробования – 115,0–150,0 м, водоприемная часть скважины – открытый ствол диаметром 112 мм. Пьезометрический уровень установлен на глубине 1,51 м от поверхности земли. Коэффициент водопроводимости отложений, определенный различными методами обработки откачки, изменяется от  $34 \text{ м}^2/\text{сут}$  (Дюпюи) до  $64\text{--}71 \text{ м}^2/\text{сут}$  ( $S - Igt$ ). На геофiltрационной модели Reg00baz принято его среднее значение ( $67,5 \text{ м}^2/\text{сут}$ ).

Водоносная зона трещиноватости архейских-нижнепротерозойских магматических и метаморфических пород (AR-PR<sub>1</sub>) приурочена к верхней выветрелой зоне пород кристаллического фундамента. Водовмещающие отложения, представленные гранитами и гранодиоритами в различной степени трещиноватыми, вскрыты к югу от месторождения на глубине 412–457 м. Они безводны и в гидродинамическом отношении представляют собой непроницаемую границу.

**Гидрография и рельеф.** В ЧГФМ Reg00baz гидрография и рельеф представлены цифровой картой рельефа и гидрографической сети водосбора карьерных полей ППП и прилегающих территорий. Планово-высотное согласование абсолютных отметок рельефа и гидрографической сети выполнено Ю. Ю. Трифоновым (рис. 2).

Основными водными объектами на территории ППП и сопредельных земель являются р. Вислица и водохранилище Погост, расположенное в 1,5–2,0 км к востоку от Новодворского месторождения, а также множественные мелиоративные каналы и канавы. С юга объект исследований ограничен реками Припятью, Пиной и Ясельдой (см. рис. 2).

Водохранилище Погост находится в Пинском районе Брестской области. Оно построено в 1976 г. на месте бывшего озера Погост и прилегающих к нему земель для орошения земель совхоза «Пархонский» и водообеспечения рыболоводного хозяйства «Полесье». Площадь водоема – 1620 га, максимальная глубина – 5,4 м, средняя глубина – 3,4 м. Водохранилище окружено дамбой-плотиной длиной 16,2 км. Объем воды – 54,5 км<sup>3</sup>, площадь водосборного бассейна – 710 км<sup>2</sup>, нормальный поддержанный уровень – 139 м, средний многолетний сток – 89,3 млн м<sup>3</sup>. Дно песчаное. Для регулирования объема воды оборудован водоспуском. Водохранилище наполняется из р. Бобрик. Колебания уровня воды на протяжении года составляют 2–3 м.



**Рис. 2. Цифровая карта рельефа и гидрографической сети водосбора карьерных полей Пинской перспективной площади и прилегающих территорий (составил Ю. Ю. Трифонов)**

**Fig. 2. The digital map of relief and hydrographical network of the catchment area of quarry fields of Pinsk prospective area and surrounding area (made by J. J. Trifonov)**

Река Вислица – правый приток р. Бобрик. Длина реки – 41,8 км. Площадь водосбора – 543 км<sup>2</sup>. Среднегодовой расход воды в устье – 2 м<sup>3</sup>/с. Основное направление течения – юго-восток, в нижнем течении – восток. Средний наклон водной поверхности – 0,2 м/км. Скорость течения воды – 0,2 м/с. Рельеф водосбора р. Вислица преимущественно плосковолнистый, с песчаными холмами и грядами высотой до 6–8 м. Долина неясно выражена. Слоны пологие, сливаются с прилегающей местностью, прорезаны сетью мелиоративных каналов.

В 1,8–2,0 км западнее месторождения Новодворское с севера на юг протекает Любельпольский канал, который начинается от р. Вислицы северо-западнее д. Новый Двор, а впадает в р. Ясельду.

Непосредственно на площади Новодворского месторождения водотоки отсутствуют, за исключением нескольких мелиоративных каналов второго порядка. Магистральные каналы в основном имеют ширину 10–13 м, глубину – 1,7–2,0 м; мелиоративные каналы второго порядка: ширину – 3,0–7,0 м, глубину – 1,0–1,4 м. Скорость течения воды в магистральных каналах – 0,1 м/с.

**Структура численной геофiltрационной модели объекта исследований.** Для воспроизведения на модели Reg00baz геологического строения и гидрогеологических условий ППП моделируемая область в плане (см. рис. 2) разбита на квадратные блоки (ячейки) размером 300 × 300 м (всего 220 блоков по оси X и 140 блоков по оси Y). В целом модель содержит 30 800 расчетных блоков в каждом слое.

В разрезе выделены следующие слои (пласти): 1) зона аэрации; 2) поверхностные водоисточники; 3) грунтовый водоносный горизонт (1-й водоносный пласт); 4) слабоводоносный днепровский моренный комплекс (1-й разделяющий слой); 5) водоносный березинский-днепровский водно-ледниковый комплекс (2-й водоносный слой); 6) березинский моренный комплекс и пачка алевритов в кровле харьковского горизонта (2-й разделяющий пласт); 7) водоносный харьковский терригенный комплекс (3-й водоносный слой); 8) слабоводоносный (слабопроницаемый) киевский терригенный комплекс (3-й разделяющий слой); 9) верхнемеловой терригенно-карбонатный комплекс (4-й водоносный слой); 10) практически безводная вулканогенная толща ратайчицкой свиты и малоритского магматического комплекса нижнего венда (4-й разделяющий слой); 11) пинские отложения рифея и зона трещиноватости архейских-нижнепротерозойских магматических и метаморфических пород – ратайчицкий водоносный горизонт (5-й водоносный пласт).

В исходной модели предполагается, что все информационные и расчетные слои имеют повсеместное распространение.

Слой «зона аэрации» предназначен для задания данных по инфильтрационному питанию (разгрузке, испарению) ГВ. По зоне аэрации создано несколько слоев: 1) абсолютные отметки поверхности земли (параметр не является обязательным, но при решении геофильтрационных задач в напорах его наличие позволяет вычислять глубины залегания УГВ); 2) интенсивность инфильтрационного питания.

**Слой «поверхностные воды»** предназначен для задания данных по параметрам взаимосвязи подземных вод с поверхностными водотоками и водоемами (далее для компактности – с реками). Для моделирования взаимосвязи предусматриваются базы картограмм соответствующих параметров. При моделировании подпретого режима взаимосвязи задаются: 1) признак наличия рек; 2) абсолютные отметки уровней воды в реках; 3) коэффициент проводимости ложа рек. Для моделирования свободного или переменного режима взаимосвязи необходимо задать абсолютные отметки дна рек. Коэффициент проводимости ложа рек в принятой постановке задается как интегральная величина, рассчитанная для всего смоченного периметра реки и с учетом фактической длины реки в блоке модели.

**Параметры проницаемых слоев (пластов, водоносных горизонтов).** Для проницаемых слоев заданы: 1) карты-идентификаторы граничных условий (параметр «граничные условия» выполняет роль идентификатора, по которому проводится проверка исходных данных); 2) цифровые карты абсолютных отметок уровней подземных вод (напоров); 3) коэффициенты проводимости; 4) коэффициент упругой емкости напорных водоносных горизонтов; 5) коэффициент гравитационной емкости для верхнего безнапорного водоносного горизонта.

**Параметры разделяющих слоев (пластов).** В вычислительной программе GWFS для моделирования вертикальных составляющих потоков подземных вод непосредственно в проницаемом слое задаются коэффициенты, характеризующие вертикальную проницаемость слоя по направлению оси  $Z$  (т. е. вниз). Это могут быть параметры как самого проницаемого слоя, так и интегральные параметры перетекания этого и нижележащего слабопроницаемого слоев. Для напорного проницаемого слоя вертикальная проницаемость не зависит от абсолютных отметок уровней подземных вод. Поэтому здесь можно (и рекомендуется) для моделирования взаимосвязи с нижележащим слоем задавать коэффициент перетекания нижележащего слоя.

По результатам моделирования предусмотрено формирование цифровых карт следующих параметров: 1) модельные изменения уровней подземных вод в слое; 2) модельные глубины залегания уровней ГВ; 3) модельные абсолютные отметки уровней подземных вод; 4) модельные (межблоковые) расходы подземных вод от узловых точек оси  $X$  и оси  $Y$ ; 5) модельные (межблоковые) перетоки (по оси  $Z$ ) подземных вод от узловых точек в нижележащий слой.

**Границы модели.** На боковых внешних границах модели Reg00baz приняты граничные условия 2-го рода ( $Q = 0$ ). Нижней границей области фильтрации является подошва зоны трещиноватости отложений кристаллического фундамента (граничное условие 2-го рода;  $Q = 0$ ). Внутренними границами являются реки, водохранилище Погост и мелиоративные каналы, которые задаются граничными условиями 3-го рода ( $Q = f(H)$ ). Верхней границей области фильтрации является уровенная поверхность ГВ. К верхней границе модели относится и гидографическая сеть ППП. Количественное представление уровенной поверхности ГВ зависит от особенностей решаемой задачи. При постоянной величине площадного питания ГВ задача обычно решается не в напорах, а в изменениях напоров подземных вод. Такое условие позволяет резко упростить реализацию гидродинамических условий на верхней границе – принять уровенную поверхность ГВ горизонтальной, т. е. напоры ГВ по всей территории задать одним числом (обычно принимается  $H = 0$ ).

Назначение создаваемой модели Reg00baz предопределяет необходимость решения гидродинамических задач в напорах (а не в изменениях напоров). Для решения задач в такой постановке, наряду со стандартным набором исходных параметров, требуются количественные сведения об интенсивности инфильтрационного питания подземных вод по всей площади моделируемого объекта. Такие сведения по ППП в настоящее время отсутствуют. Оценка интенсивности инфильтрационного питания возможна при наличии карты гидроизогипс и данных об основных гидрогеологических параметрах. Карта гидроизогипс по территории ППП также отсутствует. В период проведения предварительной разведки Новодворского месторождения базальтов выполнено бурение восьми разведочных и одной гидрогеологической скважины, по которым проведены режимные наблюдения и получены сведения по абсолютным отметкам и глубинам залегания ГВ. По этим точкам, расположенным весьма компактно на небольшом участке, возможно лишь сопоставление модельных и натурных данных по УГВ при калибровке модели.

В связи с отсутствием представительной карты гидроизогипс для количественной оценки интенсивности инфильтрационного питания ГВ нами использована цифровая карта рельефа и гидографической сети водосбора карьерных полей ППП, составленная Ю. Ю. Трифоновым (см. рис. 2). Принятый подход объясняется наличием связи между рельефом местности и уровенной поверхностью ГВ. Гидроизогипсы – это линии, соединяющие точки с одинаковой абсолютной отметкой поверхности (уровня) ГВ, т. е. линии равного напора. Система этих линий, построенная для любого участка территории, характеризует положение (абсолютные отметки) реально существующей поверхности ГВГ. В соответствии с общей закономерностью эта поверхность, как правило, в сглаженной форме «повторяет» поверх-

нность земли, снижаясь от возвышенных (междуречных) участков территории к дренирующим понижениям в рельефе [7]. Легко показать, что эта связь имеет не только статистический, но и генетический характер. Другими словами, в принятом нами подходе уровенная поверхность ГВ совмещается с поверхностью земли. Если учесть очень низкую степень дренированности территории ППП, то принятое допущение не вносит существенных ошибок в значения определяемых элементов потока (напоров ГВ и интенсивности инфильтрационного питания). Приемлемую достоверность геофильтрационной модели должна обеспечить ее калибрация.

**Методика оценки инфильтрационного питания грунтовых вод.** Инфильтрационное питание или испарение ГВ через зону аэрации в вычислительной программе GWFS реализуется на основе зависимостей (5) и (6).

Суммарная величина притока в расчетный блок через его верхнюю грань  $Q_{b_{i,j}}$  может быть оценена путем решения обратной задачи при известных граничных условиях и гидрогеологических параметрах моделируемой области по методике, разработанной нами совместно с А. А. Плетневым [8]. Суть ее заключается в задании над ГВГ фiktивной границы третьего рода в виде слабопроницаемого слоя и водоема. В фiktивном водоеме дублируются напоры ГВГ.

Коэффициент перетока (взаимосвязи) фiktивного слабопроницаемого слоя между водоносным горизонтом и фiktивным водоемом выполняет роль коэффициента регуляризации, применяемого при решении некорректных задач по методу А. А. Тихонова [9]. Его расчетное значение выбирается в зависимости от точности задаваемых на модели напоров. Идея задания фiktивной границы третьего рода над ГВГ с целью определения площадного питания подземных вод принадлежит А. А. Плетневу. Впервые она реализована в работе [8].

Результатом решения задачи в такой постановке являются расчетные значения питания ГВ по каждому блоку модели, т. е. значения параметра  $Q_{b_{i,j}}$ , входящего в зависимость (5). Данный параметр представляет собой интегральную величину площадного (поблочного) питания ГВ, которое (при заданных гидрогеологических параметрах, граничных условиях и величине подземного стока в реки) обеспечивает принятые к расчету УГВ. Проверка и уточнение полученных значений  $Q_{b_{i,j}}$  выполняется путем решения прямой геофильтрационной задачи. Для этого интенсивность инфильтрационного питания (испарения), а также поверхностные водоемы и водотоки задаются на модели в явном виде. После решения задачи производится сравнение фактических и модельных напоров в контрольных точках или по всему полю модели.

При отсутствии на модели водотоков параметр  $Q_{b_{i,j}}$  равен нулю, поэтому в соответствии с (5)

$Q_{i_{i,j}} = Q_{b_{i,j}}$ . В таком случае интенсивность инфильтрационного питания  $w_{i,j}$  в пределах расчетного блока модели с координатами  $i, j$  вычисляется по зависимости (6). Опыт наших исследований показывает, что для оценки питания подземных вод целесообразно использовать сглаженные напоры ГВ, отличия которых от фактических находятся в пределах точности их задания на модели. При таком подходе снижается ошибка в расчетных значениях  $w_{i,j}$ , обусловленная неточностью задаваемых на модели напоров и гидрогеологических параметров. В противном случае все ошибки относятся к вычисляемому значению  $w_{i,j}$ . Сглаживание целесообразно производить еще и потому, что для слабо дренированных территорий характерно плавное изменение напоров ГВ вод по площади.

При наличии на модели водотоков рассматриваемая нами задача становится сложнее, так как в соответствии с (5) возникает необходимость расчленения модельного притока в блок  $Q_{b_{i,j}}$  на две составляющие: расход ГВ в поверхностные водотоки ( $Q_{r_{i,j}}$ ) и инфильтрационный расход ГВ ( $Q_{i_{i,j}}$ ). При детальной разбивке исследуемой территории на блоки (шаг сетки небольшой), когда размеры блоков и водотоков (в пределах блока) соизмеримы, величиной  $Q_{i_{i,j}}$  в зависимости (5) можно пренебречь и полагать, что  $Q_{b_{i,j}} = Q_{r_{i,j}}$ , т. е. весь модельный приток в блок относится к расходу реки в пределах блока. Если малых водотоков много, а шаг сетки большой, то значимость питания (испарения) ГВ  $Q_{i_{i,j}}$  по блокам с реками в общем балансе существенно возрастает. В таком случае требуется независимое определение величины  $Q_{i_{i,j}}$ .

Для слабодренированных территорий раздельная оценка  $Q_{r_{i,j}}$  и  $Q_{i_{i,j}}$  становится возможной при выполнении следующих условий.

1. Все реки и водоемы дренируют ГВГ, т. е. в естественных условиях имеет место подвертый режим фильтрации подземных вод.

2. Подземный сток в реки  $Q_{\text{n.c.p.}}$  определен независимым способом.
3. Карта гидроизогипс отвечает (стационарному) квазистационарному режиму фильтрации.
4. Модельный расход ГВ в реки равен подземному стоку.
5. Между  $Q_{r_{i,j}}$  и  $Q_{b_{i,j}}$  имеется линейная зависимость

$$Q_{r_{i,j}} = \alpha Q_{b_{i,j}} + \beta, \quad (9)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты уравнения прямой линии, единые для всех блоков с реками.

Линейная связь между  $Q_{r_{i,j}}$  и  $Q_{b_{i,j}}$  является достаточно очевидной и подтверждается тесной зависимостью между  $Q_{b_{i,j}}$  и величиной напоров ГВ по блокам с водотоками, интегрально характеризующих дренирующую роль гидрографической сети. Отметим, что суммарный расход блока  $Q_{b_{i,j}}$  может принимать как положительные (приток воды в пласт), так и отрицательные (испарение ГВ, их разгрузка в реки) значения; расход ГВ в реки  $Q_{r_{i,j}}$  имеет только отрицательные значения, которые стремятся к нулю при  $Q_{b_{i,j}} = Q_{b_{\max}}$  (составляющие баланса принимаются со знаком «+» при поступлении воды в пласт).

При известном значении  $Q_{b_{i,j}}$  условие (9) позволяет найти  $Q_{r_{i,j}}$ . Значение  $\beta$  определим из выражения (9), приняв  $Q_{r_{i,j}} = 0$  при  $Q_{b_{i,j}} = Q_{b_{\max}}$ :

$$\beta = -\alpha Q_{b_{\max}}, \quad (10)$$

где  $Q_{b_{\max}}$  – максимальное значение модельного притока в блок из числа всех блоков с реками.

Подставив (10) в (9), получим:

$$Q_{r_{i,j}} = \alpha(Q_{b_{i,j}} - Q_{b_{\max}}). \quad (11)$$

Имея в виду, что  $\sum Q_{r_{i,j}} = Q_{\text{n.c.p.}}$ , найдем  $\alpha$ :

$$\begin{aligned} \sum Q_{r_{i,j}} &= \sum \alpha(Q_{b_{i,j}} - Q_{b_{\max}}) = \alpha \sum (Q_{b_{i,j}} - Q_{b_{\max}}) = Q_{\text{n.c.p.}}, \\ \alpha &= Q_{\text{n.c.p.}} / \sum (Q_{b_{i,j}} - Q_{b_{\max}}). \end{aligned} \quad (12)$$

При известных значениях  $\alpha$  и  $Q_{b_{i,j}}$  по зависимости (11) вычислим расход ГВ в реки, и далее на основе зависимости (5) оценим инфильтрационный расход

$$Q_{i,j} = Q_{b_{i,j}} - Q_{r_{i,j}}. \quad (13)$$

Такой подход обеспечивает заданный расход ГВ в реки. Разработанный метод использован нами для моделирования взаимосвязи речных и грунтовых вод на территории ППП.

#### **Оценка интенсивности инфильтрационного питания грунтовых вод на территории Пинской перспективной площади.**

Решение задачи разделено на несколько стадий:

- 1) определение оптимальной величины коэффициента регуляризации;
- 2) оценка составляющих баланса грунтовых и поверхностных вод.

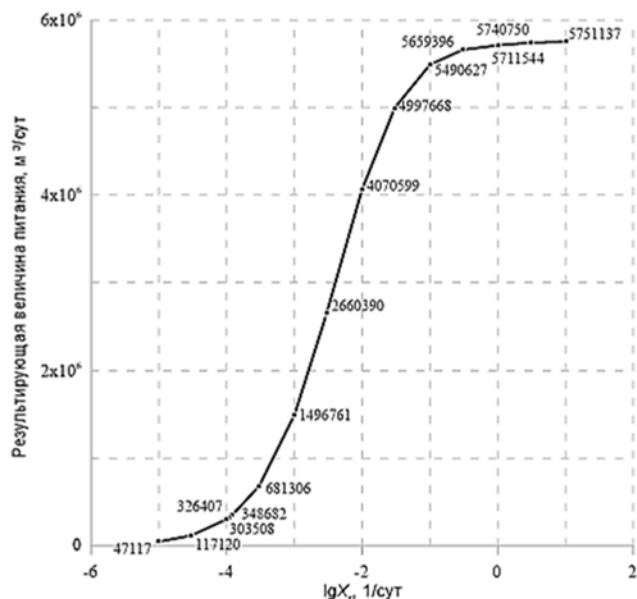
На 1-й стадии определена оптимальная величина коэффициента перетока слабопроницаемого слоя  $\chi_r$  между ГВГ и фиктивной границей. С этой целью проведена серия модельных экспериментов при различных значениях  $\chi_r$ . Результаты расчетов, полученные на базе модели Reg00baz, приведены в табл. 1, в последнем столбце которой показан дисбаланс модели, характеризующий сходимость итерационного процесса решения задачи методом Чебышева. Практически полного баланса не удалось получить лишь при самых больших значениях  $\chi_r$  (3,0–10,0 1/сут). Высокая точность вычислений составляющих водного баланса сохраняется и для отдельных водоносных горизонтов, но при некотором (чисто символическом) увеличении дисбаланса.

Как видно, результирующие величины питания и разгрузки ГВ зависят от принятого значения  $\chi_r$ , причем эта зависимость имеет логарифмический характер (рис. 3).

**Таблица 1. Зависимость расчетных показателей питания и разгрузки грунтовых вод от величины коэффициента регуляризации слабопроницаемого слоя  $\chi_r$**

**Table 1. The dependence of calculated indicators of nutrition and discharge of groundwater on the magnitude of the regularization coefficient of low permeable layer  $\chi_r$**

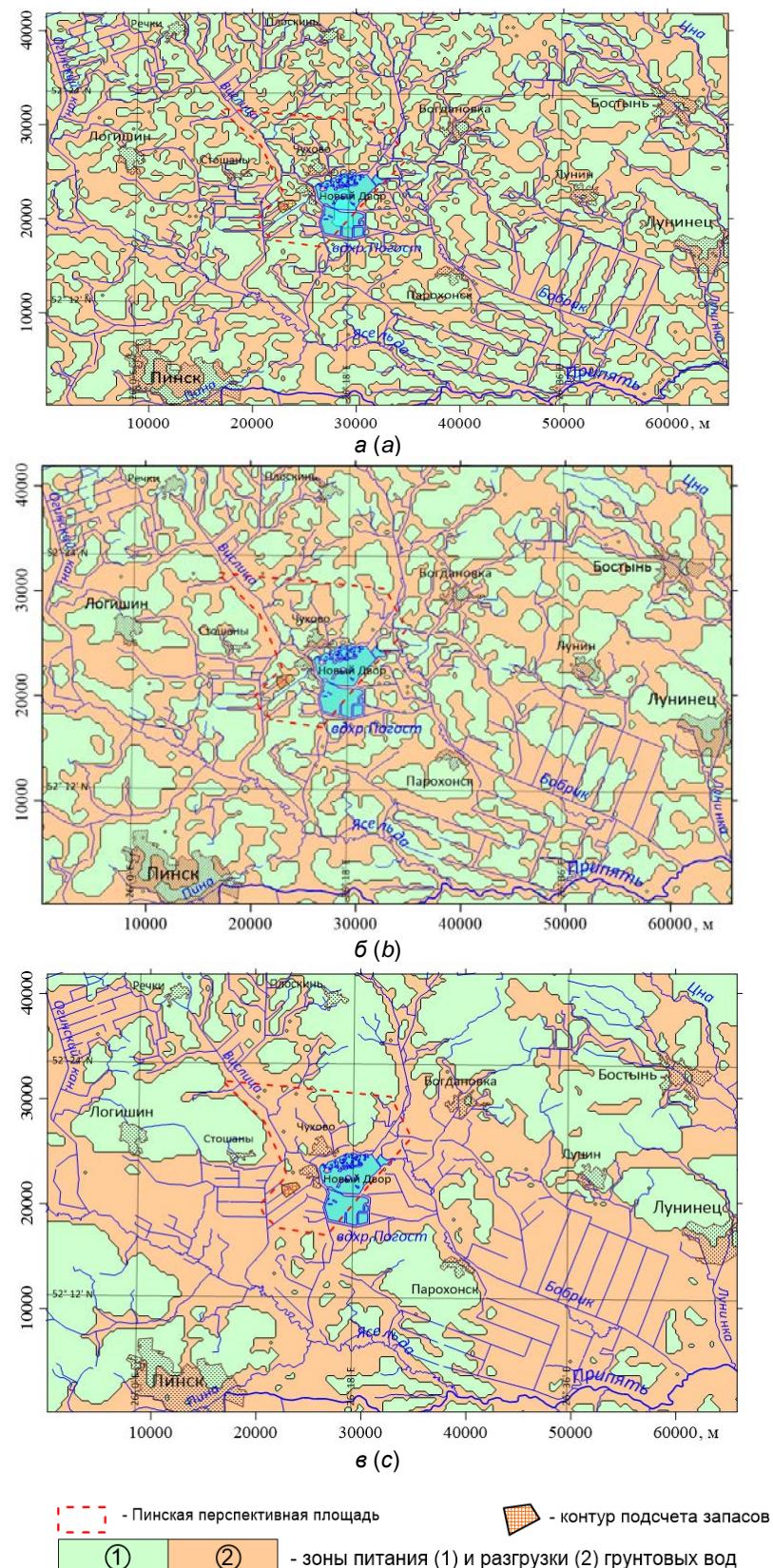
$\chi_r$ , 1/сут	Результирующая величина инфильтрационного питания и разгрузки грунтовых вод, м <sup>3</sup> /сут		Общая площадь участков питания и разгрузки грунтовых вод, км <sup>2</sup>		Дисбаланс модели, м <sup>3</sup> /сут
	питание	испарение и разгрузка в реки	питание	испарение и разгрузка в реки	
10,0	5 751 137	5 751 054	1413,0	1359,0	83,00
3,0	5 740 750	5 740 676	1385,1	1386,9	74,00
1,0	5 711 544	5 711 545	1378,8	1393,2	-1,00
0,3	5 659 396	5 659 386	1376,1	1395,9	10,00
0,1	5 490 627	5 490 625	1372,5	1399,5	1,50
0,03	4 997 668	4 997 669	1363,5	1408,5	-1,50
0,01	4 070 599	4 070 599	1349,1	1422,9	0,25
0,003	2 660 390	2 660 390	1319,4	1452,6	0,25
0,001	1 496 761	1 496 760	1286,1	1485,9	1,38
0,0003	681 306	681 306	1233,9	1538,1	0,38
0,00012	348 682	348 682	1194,3	1577,7	0,03
0,00011	326 407	326 407	1191,6	1580,4	0,06
0,0001	303 508	303 509	1187,1	1584,9	-0,22
0,00003	117 120	117 120	1163,7	1608,3	-0,61
0,00001	47 117	47 113	1123,2	1648,8	4,29



**Рис. 3. Зависимость результирующей величины инфильтрационного питания грунтовых вод от коэффициента регуляризации**

**Fig. 3. The dependence of resulting magnitude on the infiltration nutrition of groundwater from regularization coefficient**

Вместе с тем логарифмический вид зависимости свидетельствует о том, что составляющие водного баланса слабо чувствительны к величине коэффициента регуляризации. Так, при уменьшении  $\chi_r$  с 10,0 до 0,00001 1/сут (т. е. в 1 000 000 раз) расчетная величина питания ГВ через верхнюю границу уменьшается лишь в 122 раза (с 5 751 137 до 47 117 м<sup>3</sup>/сут). При этом сохраняются общие тенденции распределения участков питания и разгрузки ГВ как по абсолютным величинам, так и по знаку. В качестве примера отмеченные особенности показаны на рис. 4.



**Рис. 4. Распределение расчетных зон питания и разгрузки грунтовых вод на территории ППП при  $\chi_r$ , 1/сут: а – 0,1; б – 0,001; в – 0,00001**

**Fig. 4. The distribution of the calculated nutrition zones and groundwater discharge on PPA territory during  $\chi_r = 0.1$  1/day: a – 0,1; b – 0,001; c – 0,00001**

Интересно, что при  $\chi_r = 1,0$  1/сут и более общая площадь зон, приходящихся на инфильтрационное питание, с одной стороны, и испарение и разгрузку ГВ в реки, с другой стороны, практически равны между собой. Уменьшение коэффициента регуляризации сопровождается некоторым уменьшением размеров области инфильтрационного питания и соответствующим ростом области разгрузки ГВ в реки и в форме испарения через зону аэрации (рис. 5). Полученный результат объясняется тем, что оценка элементов питания и разгрузки ГВ производится при едином значении коэффициента регуляризации, тогда как условия взаимосвязи подземных вод с поверхностными водотоками и атмосферой зависят от многих факторов. Возможности численных методов моделирования позволяют учесть влияние этих факторов в процессе калибровки модели.

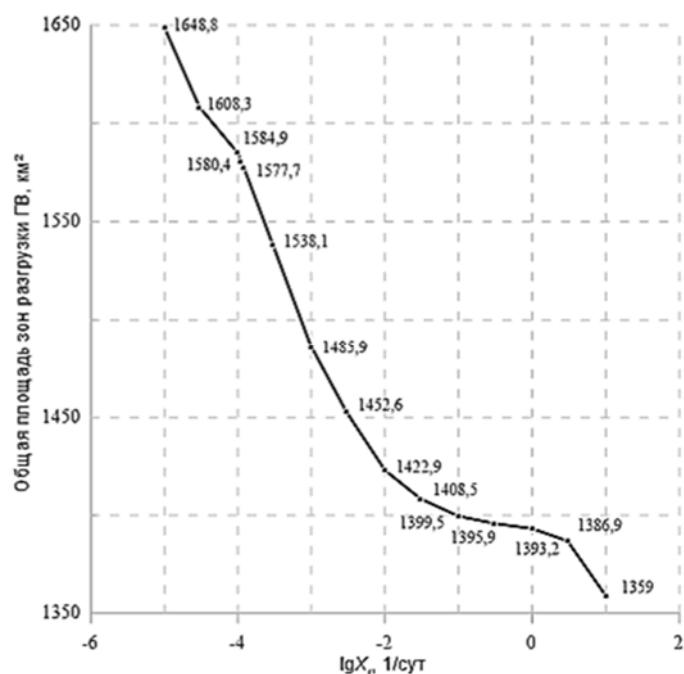


Рис. 5. Зависимость расчетных размеров области разгрузки грунтовых вод в реки и через зону аэрации от коэффициента регуляризации

Fig. 5. The dependence of calculated sizes of the discharge area of groundwater into rivers and through the zone of aeration from regularization coefficient

Приведенные выше результаты модельных экспериментов иллюстрируют высокую эффективность предложенных подходов к моделированию взаимосвязи подземных и поверхностных вод. Устойчивое и закономерное поведение регулирующей величины инфильтрационного питания ГВ при очень широком диапазоне изменения коэффициента регуляризации дает основание относиться с высокой степенью доверия к разработанной нами методике воспроизведения гидродинамических условий на верхней границе геофильтрационных моделей гидрогеологических объектов. В заключение отметим, что под оптимальной величиной коэффициента регуляризации нами понимается такое значение, при котором на геофильтрационной модели получена приемлемая сходимость натурных и модельных критериев согласования. В нашем случае удовлетворительное соответствие фактических и модельных напоров ГВ по имеющимся точкам наблюдений получено при  $\chi_r = 0,003$  1/сут.

Дальнейшая калибрация модели Reg00baz заключалась в оценке составляющих баланса грунтовых и поверхностных вод. Основной критерий согласования на данной стадии – получение на модели заданной величины подземного стока в реки, определенного независимым способом. Значение модуля подземного стока ( $M$ ) в междуречье Ясельды – Бобрика (нижнее течение р. Вислицы) взято нами с карт подземного стока, составленных С. С. Белецким [10]. Среднее значение  $M$  в нижнем течении р. Вислицы равно 1,4–1,6 л/с·км<sup>2</sup>. Ведется также сравнение фактических и модельных УГВ. Для решения этой задачи инфильтрационное питание и гидрографическая сеть на модели Reg00baz воспроизведены в явном виде. Интенсивность инфильтрационного питания ( $w$ ) принята по результатам моделирования при  $\chi_r = 0,003$  1/сут. Водоемы и водотоки, реализованные на модели как внутренние границы 3-го рода ( $Q = f(H)$ ), показаны на рис. 2. Фиктивная граница 3-го рода форме слабопроницаемого слоя и водоема из модели удалена.

Суть дальнейшего решения заключается в подборе коэффициента регуляризации и коэффициентов перетока слабопроницаемых слоев между водоносными горизонтами таким образом, чтобы глубина залегания УГВ на площади Новодворского месторождения базальтов составляла 1,5–2,0 м, а подземный сток в реки со всей моделируемой территории был равен 1,4–1,6 л/с км<sup>2</sup>. После достижения принятых показателей процесс калибрации считается завершенным.

**Результаты моделирования.** По результатам расчетов на модели Reg00baz оценена структура баланса подземных и поверхностных вод (в обобщенном виде представлена в табл. 2), построены карты гидроизогипс, глубин залегания ГВ и интенсивности инфильтрационного питания ГВ.

Суммарная величина результирующего питания ГВ, равная 391 628 м<sup>3</sup>/сут (высота слоя воды – 51,6 мм/год), представляет собой наиболее обеспеченную часть естественных ресурсов подземных вод исследуемой территории, площадь которой равна 2772 км<sup>2</sup>. Расход ГВ осуществляется в поверхностные водоисточники (184 207 м<sup>3</sup>/сут; слой стока – 24,3 мм/год) и путем испарения с депрессионной поверхности через зону аэрации (243 907 м<sup>3</sup>/сут; высота слоя воды – 32,1 мм/год). В естественные ресурсы не входит величина питания ГВ за счет восходящей разгрузки межпластовых вод (350 189 м<sup>3</sup>/сут), так как она представляет собой расход транзитного потока подземных вод: нисходящее перетекание ГВ в межпластовые водоносные горизонты на повышенных элементах рельефа и эквивалентная разгрузка межпластовых вод в ГВГ в долинах рек и других эрозионных врезах.

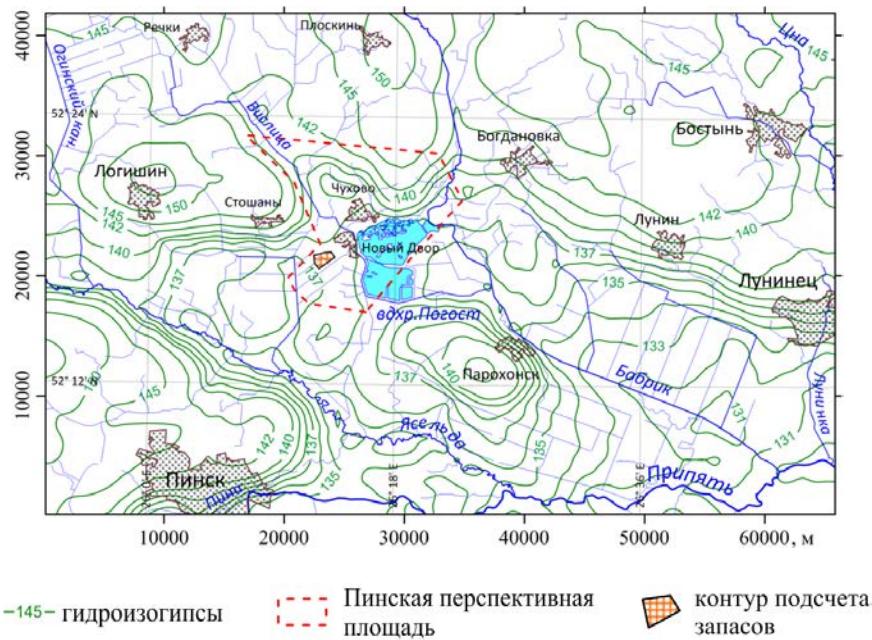
**Таблица 2. Структура баланса подземных и поверхностных вод водосбора карьерных полей Пинской перспективной площади и прилегающих территорий в естественных условиях, м<sup>3</sup>/сут**

**Table 2. The structure of the balance of the underground and surface waters of catchment area of quarry fields of Pinsk prospective area and surrounded territories in natural conditions (m<sup>3</sup>/day)**

Водоносный горизонт	Направление процесса	Питание (+) / испарение (–) грунтовых вод	Водообмен между реками и ГВГ	Расход подземных вод		Дисбаланс, м <sup>3</sup> /сут
				через подошву горизонта	через кровлю горизонта	
ГВГ	Приток	391 628	36 488	350 186	0	–0,33
	Отток	243 907	184 207	350 189	0	
БДВК	Приток	0	0	39 836	350 189	1,77
	Отток	0	0	39 837	350 186	
Харьковский ВК	Приток	0	0	19 505	39 837	0,11
	Отток	0	0	19 506	39 836	
Верхнемеловой ВК	Приток	0	0	8198	19 506	0,40
	Отток	0	0	8198	19 505	
Ратайчицкий ВГ	Приток	0	0	0	8198	0,32
	Отток	0	0	0	8198	

П р и м е ч а н и е: ГВГ – грунтовый водоносный горизонт; БДВК – березинский-днепровский водно-ледниковый комплекс; ВК – водоносный комплекс; ВГ – водоносный горизонт.

Карты гидроизогипс (рис. 6) и глубин залегания уровенной поверхности ГВ (рис. 7, а) характеризуют гидрогеологические условия исследуемой территории. Карта интенсивности инфильтрационного питания (рис. 7, б) представляет собой наиболее обеспеченную часть естественных ресурсов подземных вод и их дифференциацию по площади распространения ГВГ.



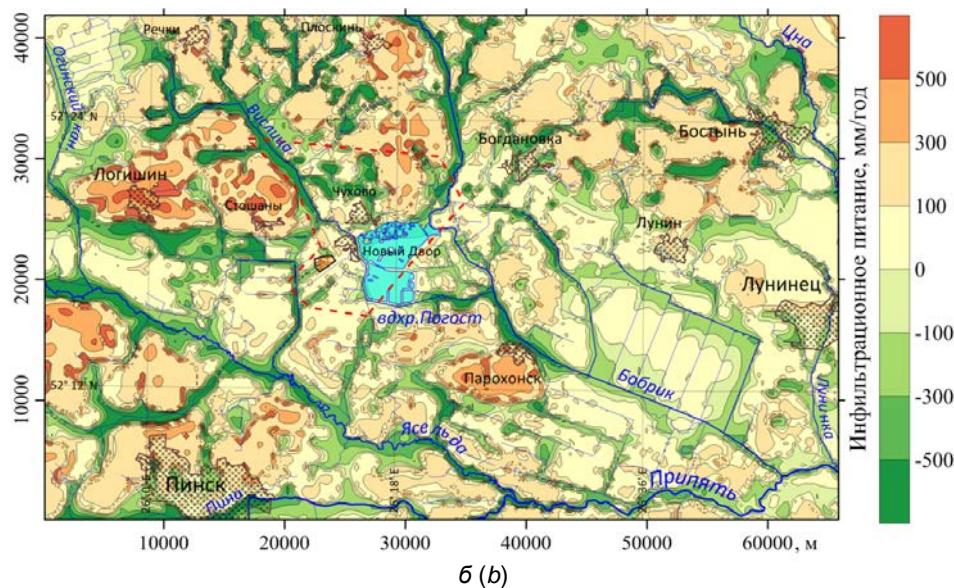
**Рис. 6. Карта гидроизогипс Пинской перспективной площади и прилегающих земель (по результатам моделирования)**

**Fig. 6. The map of hydroisohypes of Pinsk prospective area and surrounding area (according to results of modeling)**



**Рис. 7. Карты территории Пинской перспективной площади и прилегающих земель (по результатам моделирования): а – глубина залегания уровенной поверхности грунтовых вод; б – интенсивности площадного питания и разгрузки грунтовых вод через зону аэрации**

**Fig. 7. The map of Pinsk prospective area and surrounding area (according to results of modeling): a – of the depth level of surface groundwater; b – of the intensity of area nutrition and discharge of groundwater through the zone of aeration**



Окончание рис. 7

Ending of fig. 7

#### Список использованных источников

- Шестаков, В. М. Гидрография : учеб. для студентов вузов / В. М. Шестаков. – 3-е изд. – М. : КДУ, 2009. – 334 с.
- Ломакин, Е. А. Численное моделирование геофильтрации / Е. А. Ломакин, В. А. Мироненко, В. М. Шестаков. – М. : Недра, 1988. – 228 с.
- Семенова-Ерофеева, С. М. Исследование взаимосвязи поверхностных и подземных вод / С. М. Семенова-Ерофеева. – М. : ВИЭМС, 1982. – 50 с.
- Постоянно действующие модели гидролитосферы территорий городских агломераций (на примере Московской агломерации) / Ю. О. Зеегофер [и др.]. – М. : Наука, 1990. – 198 с.
- Гавич, И. К. Многолетняя изменчивость питания и режима подземных вод природно-техногенных систем верхнего этажа гидролитосферы : обзор / И. К. Гавич ; АОЗТ «Геоинформмарк». – М., 1995. – Вып. 4. – 42 с. (Гидрогеол. и инж. геология).
- Жогло, В. Г. Оценка фильтрационных свойств слабопроницаемых отложений для прогноза качества подземных вод вблизи источника загрязнения / В. Г. Жогло, А. А. Плетнев // Доклады АН Беларуси. – 1996. – Т. XXXX, № 1. – С. 114–117.
- Всеволожский, В. А. Основы гидрографии : учеб. для вузов / В. А. Всеволожский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГУ, 2007. – 448 с.
- Жогло, В. Г. К оценке интенсивности площадного питания подземных вод / В. Г. Жогло, А. А. Плетнев // Доклады АН Беларуси. – 1992. – Т. XXXVI, № 11–12. – С. 1005–1007.
- Тихонов, А. А. О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации // Доклады АН СССР. – 1963. – Т. 151, № 3. – С. 501–504.
- Белецкий, С. С. Общий подземный сток БССР / С. С. Белецкий // Комплексное использование и охрана подземных вод БССР. – Минск, 1976. – С. 20–36.

#### References

1. Shestakov V. M. *Gidrogeodinamika : ucheb. dlya studentov vuzov* [Hydrogeodynamics: textbook for university students, 3rd ed.]. Moscow, 2009, 344 p. (in Russian)
2. Lomakin E. A., Mironenko V. A., Shestakov V. M. *Chislennoe modelirovanie geofiltracii* [Numerical modeling of geofiltration]. Moscow, Bowels Publ., 1988, 228 p. (in Russian)
3. Semenova-Erofeeva S. M. *Issledovanie vzaimosvyazi poverhnostnyh i podzemnyh vod* [Study of the interconnections between surface and groundwater]. Moscow, 1982, 228 p. (in Russian)
4. Zeegofer J. O., Klyukvin A. N., Pashkovsky I. S., Roshal A. A. *Postoyanno dejstvuyushchie modeli gidrolitosfery territorij gorodskih aglomeracij (na primere Moskovskoj aglomeracii)* [Permanent models of the hydrolithosphere of the territories of urban agglomerations (on the example of the Moscow agglomeration)]. Moscow, Science Publ., 1990, 198 p. (in Russian)

5. Gavich I. K. *Mnogoletnyaya izmenchivost' pitaniya i rezhima podzemnyh vod prirodno-tehnogenykh sistem verhnego etazha gidrolitosfery : obzor* [Long-term variability of the supply and regime of groundwater in natural-technogenic systems of the upper level of the hydrolithosphere : review ; CJSC "Geoinformmark"]. Moscow, 1995, iss. 4, 42 p. (Hydrogeological and engineering geology). (in Russian)
6. Zhoglo V. G., Pletnev A. A. *Ocenka fil'tracionnyh svojstv slabopronicaemyh otlozhenij dlya prognoza kachestva podzemnyh vod vblizi istochnika zagrязneniya* [Evaluation of the filtration properties of low-permeability deposits for predicting the quality of groundwater near the source of pollution]. *Reports of the Academy of Sciences of Belarus*. 1996, vol. XXXX, No. 1, pp. 114–117. (in Russian)
7. Vsevolozhsky V. A. *Osnovy gidrogeologii : uchebnik dlya vuzov* [Fundamentals of hydrogeology : textbook for universities, 2nd ed.]. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 2007, 448 p. (in Russian)
8. Zhoglo V. G. *K oценке интенсивности плашчадного питания подземных вод* [On the assessment of the intensity of areal groundwater recharge]. *Reports of the Academy of Sciences of Belarus*, 1992, vol. XXXVI, no. 11–12, pp. 1005–1007. (in Russian)
9. Tikhonov A. A. *O reshenii nekorrektno postavlennyh zadach i metode reguliarizacii* [On solving incorrectly set tasks and the regularization method]. *Reports USSR Academy of Sciences*, 1963, vol. 151, no. 3, pp. 501–504. (in Russian)
10. Beletsky S. S. *Obshchij podzemnyj stok BSSR* [Total underground flow of the BSSR]. *Complex use and protection of underground waters of the BSSR*. Minsk, 1976, pp. 20–36. (in Russian)

#### Информация об авторе

**Жогло Василий Гаврилович** – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидро-геологии и гидроэкологии, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: w.zhoglo50@tut.by

#### Information about the author

**Vasily G. Zhoglo** – Dr. Sc. (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of Hydrogeology and Hydroecology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: w.zhoglo50@tut.by

**ЮБИЛЕИ**  
**JUBILEE****К 90-летию академика Ивана Ивановича Лиштвана**  
*To the 90th anniversary of Academician Ivan Ivanovich Lishtvan*

3 ноября 2022 г. исполнилось 90 лет главному научному сотруднику лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем Института природопользования Национальной академии наук Беларусь, доктору технических наук, профессору, академику НАН Беларусь, заслуженному деятелю науки и техники Республики Беларусь Ивану Ивановичу Лиштвану.

И. И. Лиштван в 1956 г. с отличием окончил торфяной факультет Белорусского политехнического института. В 1958 г. по направлению Академии наук БССР поступил в целевую аспирантуру при кафедре физики Московского торфяного института, где его научным руководителем стал известный физик-реолог профессор М. П. Воларович. Параллельно с обучением в аспирантуре Иван Иванович осваивал химические дисциплины на химическом факультете Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Под руководством академика П. А. Ребиндера принимал участие в постановке лабораторных работ по коллоидной химии, окончил курсы по радиохимии при химическом факультете МГУ. В 1961 г. И. И. Лиштван защитил кандидатскую диссертацию

цию на тему «Физико-химические основы управления структурно-реологическими свойствами торфа и гуминовых веществ». После перевода торфяного института из г. Москвы в г. Калинин работал в Калининском торфяном институте (теперь – Тверской государственный технический университет), где под руководством профессоров М. П. Воларовича и Н. В. Чураева вместе с известным ученым-теплофизиком Н. И. Гамаюновым создал лабораторию по изучению физико-химических свойств торфа, руководил лабораторией радиоактивных методов исследования дисперсных систем, а затем – проблемной лабораторией по комплексному использованию торфа в народном хозяйстве. В 1969 г. Иван Иванович защитил докторскую диссертацию на тему «Исследование физико-химической природы торфа и процессов структурообразования в природных системах с целью регулирования их свойств» и, создав кафедру физики и химии торфа, возглавил ее. В 1971 г. И. И. Лиштвану было присвоено звание профессора.

В 1973 г. Иван Иванович был приглашен в Академию наук БССР на должность директора Института торфа, что положило начало новому и наиболее яркому этапу его научной и организаторской деятельности. Здесь он создал лабораторию физико-химической механики природных дисперсных систем, бессменным руководителем базовых научных исследований которой является и по сей день.

Находясь на посту директора и заведующего лабораторией, И. И. Лиштван оперативно начал создавать школу физико-химической механики и процессов тепло- и массопереноса в органогенных природных средах. Институт и лабораторию стали систематически посещать ведущие ученые России, Украины и других республик СССР по направлениям деятельности лаборатории, такие как академики РАН Б. В. Дерягин, А. И. Русанов, академик НАН Украины Ф. Д. Овчаренко, профессора Н. В. Чураев, Н. И. Гамаюнов, Л. С. Амарян, А. Е. Афанасьев, Е. Т. Базин, Е. Д. Щукин, Н. Б. Урьев. Установились тесные научные связи, что позволило лаборатории в сравнительно короткие сроки выйти на достаточно высокий уровень в исследовании процессов тепло- и массопереноса в торфе, заторфованных грунтах и сапропелях.

Особую помощь коллективу лаборатории оказал соратник и друг Ивана Ивановича, известный ученый в области физико-химии поверхностных явлений, профессор Института физической химии РАН Н. В. Чураев. Под его руководством и при непосредственном содействии в лаборатории были подготовлены кандидатские диссертации А. М. Абрамцом, И. В. Дедюлей и Л. Н. Маевской. Он также выступил оппонентом кандидатской диссертации Г. П. Бровки.

Неоценимую роль в организации и становлении лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем сыграл А. А. Терентьев, которого И. И. Лиштван в 1974 г. пригласил из Калининского государственного технического института (теперь – Тверской государственный технический университет) для работы в Институте торфа АН Беларуси. Под руководством Ивана Ивановича А. А. Терентьев в 1990 г. защитил докторскую диссертацию, а в 1996 г. его избрали членом-корреспондентом НАН Беларуси.

Под организационно-методическим руководством И. И. Лиштвана в лаборатории начало интенсивно развиваться новое для Беларуси направление в области тепло- и массопереноса в промерзающих горных породах. На эту тему было защищено 5 кандидатских и 1 докторская диссертация. В период 1978–1985 гг. сотрудниками лаборатории были выполнены договорные работы с проектными организациями России с выездом в регионы с многолетней мерзлотой (Г. П. Бровка, П. Н. Давидовский, И. В. Дедюля, А. А. Мурашко, И. И. Романенко) для проведения инженерных изысканий при освоении газоконденсатных месторождений на полуострове Ямал и Вынгапуре.

В течение последних 15 лет наработки лаборатории в области исследования теплофизических и деформационно-прочностных характеристик мерзлых горных пород использованы для обоснования проектов проходки шахтных стволов калийных рудников с применением искусственного замораживания. Выполнены соответствующие договорные работы для строительства 9 новых калийных рудников (в Беларуси – 5, России – 2, Туркмении и Таиланде – по 1).

Опыт работы Ивана Ивановича в области радиохимии пригодился при организации исследований процессов переноса радиоактивных загрязнений в торфяно-болотных почвах. В период 1986–2003 гг. лаборатория принимала активное участие в работах по минимизации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС с выездом на загрязненные территории Республики Беларусь (А. М. Абрамец, Г. П. Бровка, П. Н. Давидовский, И. В. Дедюля, А. А. Мурашко).

Важной сферой научных интересов И. И. Лиштвана является также адаптация местных твердых горючих ископаемых для использования в энергетическом балансе Республики Беларусь. Под его руководством создана научная группа, которая провела комплекс исследований по термохимической переработке имеющихся в республике бурых углей и горючих сланцев с целью получения новых энергоносителей. В результате разработаны наиболее приемлемые для Беларуси способы переработки бурых углей и горючих сланцев, а также их композиций с бытовыми горючими отходами, включая различные полимеры. Под руководством Ивана Ивановича также выполнен цикл работ по получению из белорусских бурых углей ряда новых продуктов как топливного, так и нетопливного направлений.

По заданию Министерства энергетики Республики Беларусь под руководством И. И. Лиштвана разработано обоснование создания на базе торфяного месторождения «Туршевка – Чертово» горнохимического комбината по глубокой комплексной переработке торфа для получения продукции с высокой добавленной стоимостью (активированных углей, гуматных препаратов, гранулированных удобрений, сорбентов загрязняющих веществ) с использованием технологий, разработанных в результате многолетних исследований в Институте природопользования НАН Беларуси.

По инициативе и при участии Ивана Ивановича ведутся работы по нетопливному использованию твердых горючих ископаемых Республики Беларусь. Результатом многолетних исследований стала разработка серии гуминовых препаратов для озеленения засушливых и пустынных территорий. С 2003 г. проводятся натурные испытания разработанных препаратов и технологий их применения в странах с аридным климатом, в частности в странах Персидского залива. Установлена их высокая эффективность, состоящая в повышении приживаемости растений и снижении непроизводственных потерь воды. При участии И. И. Лиштвана проводятся исследования гуминовых веществ торфа в целях использования их бальнеологической активности. В настоящее время обоснованы требования к гуминовым препаратам для грязеразводных ванн и проводятся испытания их экспериментальных партий. Изучение реологических свойств водных дисперсий торфа и сапропеля позволило разработать эффективные экологобезопасные буровые реагенты на их основе.

Успехи Ивана Ивановича Лиштвана в трудовой деятельности высоко оценены руководством НАН Беларуси и нашей страны. В 1974 г. он был избран членом-корреспондентом, а в 1980 г. – академиком АН БССР. С 1987 по 1992 г. являлся вице-президентом АН БССР, с 1992 по 2002 г. – академиком-секретарем Отделения химии и наук о Земле НАН Беларуси. В 1978 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники Белорусской ССР». В 1997 г. за выдающиеся результаты, полученные при выполнении совместного научного исследования «Новые углеродные адсорбенты из местного сырья для решения проблем экологии и медицины» И. И. Лиштвану присуждена премия академий наук Украины, Беларуси и Молдовы. В 1998 г. он награжден орденом Франциска Скорины, в 1982 г. – орденом Дружбы народов. В 2002 г. за цикл работ по диагностике состояния природной среды на основе аэрокосмических, лидарных, наземных и химико-аналитических методов и средств

Иван Иванович удостоен Государственной премии Республики Беларусь. В 2009 г. он награжден медалью «За трудовые заслуги». Является почетным экологом Республики Беларусь. Награжден межотраслевым знаком «Горняцкая слава» первой, второй и третьей степеней, золотой медалью научно-промышленной палаты Евросоюза, Почетными грамотами правительства Республики Беларусь, ряда министерств и органов государственного управления.

В течение многих лет И. И. Лиштван входил в состав экспертного совета ВАК СССР по специальности «Разработка месторождений твердых полезных ископаемых», принимал участие в разработке нормативных документов при создании ВАК Республики Беларусь. Иван Иванович является председателем и членом ряда советов по защите докторских и кандидатских диссертаций.

И. И. Лиштван был сопредседателем комиссии Парламентского собрания Союза Беларуси и России по вопросам экологии, природопользования и ликвидации последствий аварий, был избран иностранным членом Польской академии наук, Горной академии наук России, почетным членом Международного торфяного общества, является почетным профессором ряда университетов. Иван Иванович – член редколлегий журналов «Известия НАН Беларуси. Серия химических наук», «Коллоидный журнал», «Химия твердого топлива», «Химия в интересах устойчивого развития», «Промышленная безопасность», «Торф и бизнес», «Химия и технология воды», «Энергетическая стратегия», «Энергоэффективность».

Академик И. И. Лиштван широко известен в нашей стране и за рубежом как крупный ученый в области коллоидной химии и физико-химической механики природных дисперсных систем, природопользования, охраны окружающей среды и экологии. Под его руководством и при непосредственном участии выполнены важнейшие работы по физикохимии торфа, гуминовых веществ, битумов и биологически активных соединений. Большое научное и практическое значение имеют его работы в области ионного обмена, гидрофильтрации, тепломассопереноса и реологии органогенных природных дисперсных материалов при положительных и отрицательных температурах. Иван Иванович впервые предложил и обосновал факторы, определяющие структуру торфа как сложной многокомпонентной полуколлоидно-высокомолекулярной системы с признаками полиэлектролитов и микромозаичной гетерогенности, а также возможность применения сапропелей в технологии геологоразведочного и промыслового бурения скважин и других областях экономики.

По результатам исследований И. И. Лиштваном лично и в соавторстве опубликовано более 1200 изданий, в том числе 46 монографий, учебные пособия, брошюры, научные статьи, им получено 98 авторских свидетельств на изобретения и патентов. Иван Иванович подготовил 7 докторов и 45 кандидатов наук.

С 1991 г. И. И. Лиштван руководит и занимается вопросами научно-организационного и финансового сопровождения государственных научно-технических и государственных программ экологического и природоохранного профиля. В настоящее время он осуществляет научное руководство подпрограммой «Устойчивое природопользование и инновационные технологии переработки, охраны и воспроизводства природных ресурсов» государственной научно-технической программы «Зеленые технологии ресурсопользования и экобезопасности», 2021–2025 гг.

Ивана Ивановича Лиштвана отличают безграничный научный кругозор, беспределная работоспособность, строжайшая самодисциплина, высочайшая требовательность к себе и своим подчиненным, активная жизненная позиция, готовность пойти на преодоление любых препятствий ради достижения поставленной высокой цели, и в особенности, если это затрагивает государственные интересы. Следует отметить, что несмотря на требовательное отношение к подчиненным, Иван Иванович внимательно вникает в их личные проблемы и всегда готов дать совет и оказать необходимую помощь. Уникальное сочетание таких качеств снискали И. И. Лиштвану глубокое уважение в научных кругах Республики Беларусь и за ее пределами.

И сейчас Иван Иванович полон научных идей, замыслов, творческих планов, сил, готовности продолжать служить науке во благо Родины.

*От всей души желаем Ивану Ивановичу долгих лет жизни, активной и плодотворной деятельности, крепкого здоровья и благополучия!*

**С. А. Лысенко, А. Э. Томсон, Г. А. Камышенко, А. И. Сорокин, Г. П. Бровка,  
Ю. Г. Янута, Б. В. Курзо, В. А. Ракович, А. В. Высоценко**

---

## **О научной деятельности академика И. И. Лиштвана в период его работы в Калининском политехническом институте**

*On the scientific activity of Academician I. I. Lishtvan  
during his work at the Kalinin Polytechnic Institute*

В 2022 г. исполняется 100 лет со дня основания Московского торфяного института (теперь – Тверской государственный технический университет, и 90 лет со дня основания Института торфа (теперь – Институт природопользования НАН Беларусь). Славные страницы истории последнего тесно связаны с судьбами как многочисленных его выпускников, так и представителей профессорско-преподавательского состава, которые были настоящими патриотами вуза и внесли значительный вклад в формирование инженерно-технического корпуса в области энергетики, торфяного дела, сельского хозяйства, экологии и природопользования (Горный журнал. 2022. № 5. С. 9–22).

Формирование научных школ природопользования происходило при тесном взаимодействии ученых Твери и Минска. Традиции Московского торфяного института были поддержаны научным сообществом на тверской земле после перевода института в город Калинин.

Именно в этот важный для развития вуза период значительный вклад в общее дело внес академик Национальной академии наук Беларусь Иван Иванович Лиштван – известный в Российской Федерации и других зарубежных странах ученый в области коллоидной и физической химии торфа.

В 1958–1973 гг. Иван Иванович работал в Калининском политехническом институте.

Первая научная статья с участием И. И. Лиштвана «Изучение торфяных гуминовых золей. Структурно-механические свойства и их изменение при действии добавок» была опубликована в Коллоидном журнале в 1960 г. (т. XXII, вып. 5; соавторы: М. П. Воларович, Н. В. Чураев).

В 1961 г. в Калининском торфяном институте Иван Иванович защитил кандидатскую диссертацию на тему «Физико-химические основы управления структурно-реологическими свойствами торфа и гуминовых веществ» (научный руководитель – доктор физико-математических наук профессор М. П. Воларович, консультант – кандидат технических наук доцент Н. В. Чураев). В ней исследованы структурно-реологические и физико-химические свойства торфа и гуминовой коллоидной фракции торфа под действием химических добавок с целью получения продукции с заданными качественными показателями.

В 1964–1965 гг. под руководством М. П. Воларовича и Н. В. Чураева выполнена большая научно-практическая работа по оценке физико-химических свойств торфов Северо-Западной, Центральной и Уральской торфяно-болотных зон, в которой ответственными исполнителями являлись И. И. Лиштван, В. Д. Копенкин, Л. С. Амарян. В рамках этой работы проведены детальные исследования содержания физико-химически и прочносвязанной воды, подвижных катионов кальция, меди, алюминия, железа, натрия, а также фракционного состава и кислотности торфа. Изучение высокодисперсной части торфа (<1 мк) проводили с использованием современного электронного микроскопа.

Результаты исследований были широко представлены в журналах «Заводская лаборатория», Коллоидном журнале, сборниках научных трудов.

В 1965–1968 гг. Иван Иванович являлся научным руководителем по теме «Разработка единой классификации торфа», выполняемой совместно с трестом «Геолторфразведка» (ответственные исполнители – кандидат технических наук доцент В. Д. Копенкин, старший инженер О. А. Зеленая). Были исследованы состав и свойства наиболее распространенных видов торфа Европейской части РСФСР. Разработанная классификация упростила оценку торфа для различных производств при геологоразведочных работах и позволила производить выбор торфяного сырья для промышленности и сельского хозяйства более рационально и эффективно.

В 1969 г. в Калининском политехническом институте И. И. Лиштван защитил докторскую диссертацию на тему «Исследование физико-химической природы торфа и процессов структурообразования в торфяных системах с целью регулирования их свойств». Научный консультант – доктор физико-математических наук профессор М. П. Воларович.

В 1969 г., когда в Калининском политехническом институте с участием Ивана Ивановича была организована кафедра физики и химии торфа, он стал ее заведующим. Кафедра проводила научные исследования в области комплексного использования торфяных ресурсов. В 1971 г. И. И. Лиштвану было присвоено звание профессора.

Под руководством профессоров М. П. Воларовича, Н. В. Чураева, Н. И. Гамаюнова И. И. Лиштван участвовал в создании лаборатории по изучению физико-химических свойств торфа. Он руководил лабораторией радиоактивных методов исследования дисперсных систем, затем в 1970-е гг. – проблемной лабораторией по комплексному использованию торфа в народном хозяйстве.



**Химико-технологический корпус Тверского государственного технического университета**

**Chemistry and Technology Building of Tver State Technical University**

В 1971 г. Иваном Ивановичем в соавторстве с М. В. Поповым, Е. Т. Базиным и А. А. Терентьевым был подготовлен и опубликован «Практикум по физике и химии торфа», который на протяжении более 50 лет является настольной книгой студентов, бакалавров, магистрантов и аспирантов вуза.

И. И. Лиштван внес большой вклад в изучение компонентного состава торфа и его ионообменных свойств. Им установлено, что высокая способность структуры торфа к участию в ионообменных процессах обеспечивает возможности управления свойствами торфяного сырья и продуктов из него путем химического модифицирования.

В своих научных работах Иван Иванович всегда применял новейшие для того времени методы исследования торфа и природных дисперсных систем: ЭПР- и ЯМР-спектроскопию, электронную микроскопию, калориметрию, методы реологии, радиоактивные изотопы для изучения процессов переноса, адсорбции, ионного обмена и других физических и физико-химических свойств торфа.

На кафедре физики, затем – кафедре физической и коллоидной химии, ученый читал курсы лекций по физике торфа, физической и коллоидной химии.

В 1973 г. И. И. Лиштван был приглашен в Академию наук БССР на должность директора Института торфа, где им была организована лаборатория физико-химической механики природных дисперсных систем.

В 1990 г. по инициативе Ивана Ивановича Институт торфа был преобразован в Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси, директором которого он работал до 1997 г.



**И. И. Лиштван (3-й справа) в кругу коллег по работе на производственной базе**

**I. I. Lishtvan (3rd right) in the circle of colleagues at the production base**

В эти годы И. И. Лиштвану удалось: установить комплекс факторов, определяющих структурное строение торфяных систем; провести комплексные исследования гидрофильтрности, тепломассопереноса и реологических параметров органогенных природных дисперсных материалов; предложить классификацию торфа, основанную на содержании катионов и сорбированной влаги; разработать зависимости для расчета основных характеристик состава и свойств торфа; установить закономерности переноса влаги и ионного обмена при сушке и промерзании торфа; на основе предложенной промышленно-генетической классификации торфа обозначить основные направления его использования в экономике; исследовать миграцию и диффузию радионуклидов в природных средах, физико-химической связанной воды; решать экологические проблемы с учетом особенностей природопользования в Республике Беларусь.

Сегодня почетный директор Государственного научного учреждения «Институт природопользования Национальной академии наук Беларусь», академик и иностранный член Польской академии наук Иван Иванович Лиштван ведет активную научную и общественную деятельность, является научным руководителем подпрограммы государственной научно-технической программы экологического и природопользовательского профиля, участвует в международных научно-практических симпозиумах и конференциях, воспитывает молодых специалистов и ученых в области природопользования, является лидером научной школы.



**И. И. Лиштван – учитель и наставник молодых ученых  
(в перерыве конференции в Тверском государственном техническом университете, Тверь)**

**I. I. Lishtvan – teacher and mentor of young scientists  
(during a break in the conference at Tver State Technical University, Tver)**

В разные годы представители калининской школы ученых торфяников работали в учебных и научных организациях Республики Беларусь – это доктора технических наук Н. С. Панкратов, А. А. Терентьев, Б. А. Богатов, Б. Ф. Зюзин и др.

Именно здесь профессором Б. Ф. Зюзином был сделан доклад на тему «Дистортность в процес- сах торфяного производства». 27 мая 1994 г. можно считать официальной датой рождения нового научного направления как универсального метода оценки инвариантов предельных состояний в природных системах.

Теория дистортности была использована для обоснования оптимальных концентраций металло-полимерных композиционных материалов и удостоена «Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники» в сфере обороны и безопасности страны за разработку и создание новой техники (2012).

В 1996 г. в Институте проблем использования природных ресурсов и экологии был проведен первый научный семинар на тему дистортности, который определил главную цель в разработке ее концепции – построение общей теории предельных состояний для различных природных структурных систем и объектов искусственного интеллекта.

На современном этапе развития науки о торфе в Тверском государственном техническом университете традиции патриархов, таких как С. Г. Солопова, И. Г. Блоха, В. Г. Булычева, М. П. Воларович, В. С. Варенцов,

В. Я. Антонов, В. Д. Копенкин, В. М. Наумович, М. В. Мурашов, Н. И. Гамаюнов, Л. С. Амарян, Л. Н. Самсонов, А. Е. Афанасьев, А. Н. Лукьянчиков, Н. В. Чураев, Е. Т. Базин, В. И. Суворов продолжают развивать доктора наук А. В. Твардовский, В. А. Миронов, Б. В. Палюх, В. Г. Зубчанинов, Г. А. Дмитриев, В. И. Горячев, В. Д. Горячев, В. Ф. Синицын, О. С. Горфин, О. С. Мисников, Б. Ф. Зюзин, Ю. Н. Женихов, В. В. Панов, М. Г. Сульман, С. Н. Гамаюнов, К. В. Фомин, А. Н. Болотов, И. В. Горлов, Г. А. Александров, А. Л. Яблонев, А. В. Кондратьев и их многочисленные ученики – кандидаты наук.

И. И. Лиштван является Почетным профессором Тверского государственного технического университета, сведения о его деятельности отражены в четырех изданиях «Золотой книги Тверского государственного технического университета».

В юбилейный год многочисленный коллектив Тверского государственного технического университета шлет горячие поздравления и самые искренние пожелания благополучия несомненному лидеру калининской (теперь – тверской) и минской научных школ природопользования.

*Б. Ф. Зюзин – доктор технических наук,  
О. С. Мисников – доктор технических наук,  
Л. В. Копенкина – кандидат технических наук  
Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия*

## **Юбилей профессора Галины Васильевны Наумовой**

### *Jubilee of Professor Galina Vasilyevna Naumova*

20 ноября исполнилось 90 лет доктору технических наук профессору Галине Васильевне Наумовой.

Г. В. Наумова посвятила торфяной науке 67 лет, став известным ученым в области химической технологии твердых горючих ископаемых. Глубоко символично, что Галина Васильевна отмечает свой юбилей одновременно с юбилеем Института природопользования НАН Беларуси (в прошлом – Института торфа АН БССР), в стенах которого прошел наиболее яркий и плодотворный этап ее научной деятельности, с которым связана вся ее творческая судьба. О событиях, включающих многогранную деятельность, успехи и достижения нашего института, она может рассказать с гордостью и не понаслышке, ведь научно-исследовательская работа в его стенах стала делом жизни Галины Васильевны.

Г. В. Наумова родилась в 1932 г. в г. Москве, в семье студента, который после окончания учебы в 1935 г. был направлен в Беларусь, где работал на руководящих должностях в отрасли спиртовой промышленности.

Довоенное детство Галины Васильевны не было радужным, так как в начале 1937 г. ее отец был репрессирован, а мать вместе с детьми бедствовала без жилья и работы. В 1939 г. отец был реабилитирован, а в 1941 г. ушел на фронт.

В первые дни войны члены семьи Г. В. Наумовой стали беженцами. Они на товарных поездах под бомбежками добрались в тыл (Горьковская область), где Галина Васильевна училась в сельской школе, а летом в возрасте 10–12 лет трудилась в колхозе на полевых работах вместе с мамой.

В 1945 г. вернулся с войны отец – участник обороны Сталинграда, освобождения Польши и Пруссии, о чем свидетельствуют его фронтовые награды.

Семья возвратилась в Беларусь, где в 1950 г. в г. п. Ивацевичи Г. В. Наумова в числе лучших учеников окончила среднюю школу и в этом же году поступила в Минске в Белорусский политехнический институт (теперь – Белорусский национальный технический университет) на химико-технологический факультет, желая стать специалистом в области спиртового производства, как и ее отец.

Закончив обучение в институте в 1955 г., Галина Васильевна получила диплом инженера-технолога бродильных производств. Однако стать потомственным «спиртовиком» ей не довелось.

В 1957 г. на Опытной станции Института торфа АН БССР начала функционировать первая опытная химическая установка по производству торфяного воска, где требовалась специалисты химического профиля, и Г. В. Наумова была зачислена на работу инженером-химиком-технологом. Так решилась дальнейшая судьба Галины Васильевны, приведшая ее в науку о торфе. Тогда на опытной установке отрабатывались основные оптимальные режимы воскового производства, что легло в основу исходных данных для проектирования и создания будущего завода горного воска.

Для Г. В. Наумовой указанные работы явились хорошей школой по освоению новых технологий в опытном масштабе с выходом на создание более крупного производства, что не раз в дальнейшем ей пришлось осуществлять вместе с сотрудниками в качестве руководителя новых разработок. В 1958 г. она возглавила лабораторию Торфяной опытной станции, где с сотрудниками провела весь комплекс технических анализов торфа.

Одновременно с этим Галина Васильевна принимала участие в научно-исследовательских работах института по изучению изменения битумов торфа при саморазогревании. В результате исследований было показано, что саморазогревание торфа приводит к существенным потерям битуминозной части и это связано с окислением его смолистых веществ.

Увлеченностю Г. В. Наумовой научно-исследовательской работой, умение четко наладить дела в лаборатории опытной станции не остались без внимания руководства института. Галине Васильевне было предложено поступить в аспирантуру.

Сдав на оценку «отлично» все кандидатские минимумы, в 1962 г. Г. В. Наумова поступила в очную аспирантуру Института торфа АН БССР по специальности «Химическая технология топлива



и газа» и досрочно представила диссертационную работу на тему «Изменение химического состава сфагновых торфов и мхов при саморазогревании» (1965).

После окончания аспирантуры и успешной защиты диссертации (в начале 1967 г.) Галина Васильевна Наумова работала в должности младшего научного сотрудника, а затем – старшего научного сотрудника в лаборатории саморазогревания торфа. Благодаря ее исследованиям выявлена важная роль ферментов торфа на начальной стадии его саморазогревания. Показано, что энзимами богата торфяная залежь первых лет добычи торфа. Установлено затухание ферментативной активности в глубине залежи, а в погребенных торфах жизнедеятельность ферментов вовсе не обнаружена. Результаты этих работ опубликованы в монографии «Превращение торфа и его компонентов в процессе саморазогревания при хранении» (1972), где предложено рассматривать ферментативную активность торфа как диагностический показатель его склонности к саморазогреванию при хранении.

В 1972 г. в должности старшего научного сотрудника Галина Васильевна была переведена в лабораторию физико-химии торфа, где под ее руководством создана научно-исследовательская группа для разработки импортозамещающих антиадгезионных (разделительных) составов на основе восковых композиций для формования изделий из пенополиуретана, используемых в автомобилестроении, в частности при производстве легковых автомобилей. Такие восковые композиции были необходимы автомобильным заводам страны, в первую очередь Волжскому автозаводу (ВАЗу), и закупались в Италии и Германии.

Первым удачным решением коллектива разработчиков (П. И. Белькевич, Г. В. Наумова, Д. А. Хоняк, А. И. Некрашевич) явился отечественный антиадгезив «ИТАН», для производства которого по заданию Минхимпрома СССР в 1973 г. была создана промышленная установка по его выпуску на Заводе горного воска. Затем были разработаны антиадгезивы «Свислочь», «Белка» и другие для формования изделий из полужесткого и интегрального полиуретана. За разработку и внедрение импортозамещающих антиадгезивов на предприятиях страны (Волжский автозавод, Сызранский завод пластмасс, Московский АЗЛК, Ижевский автозавод, Запорожский автозавод) коллектив разработчиков института неоднократно был поощрен премиями Минхимпрома СССР и награжден золотыми, серебряными и бронзовыми медалями ВДНХ СССР.

С 1975 г. на протяжении 18 лет Г. В. Наумова занимала должность заведующего лабораторией биотехнологий. В 1980-х годах в связи с недостатком кормов в республике этой лабораторией была разработана серия кормовых добавок для животноводства с использованием продуктов переработки малоразложившегося сфагнового торфа, в том числе торфяной мелассы, осахаренного торфа, торфобордяного корма, а также амидоконцентратных добавок, включающих мочевину, сапропель и торф, которые позволяли пополнить кормовые рационы крупного рогатого скота, особенно в неурожайные годы. Это явилось основанием для защиты Галиной Васильевной диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по теме «Углеводно-гуминовый комплекс торфа, его переработка и использование» (1987).

Одновременно в этот период в лаборатории начали проводиться исследования по оценке торфа и продуктов его химической деструкции как источника биологически активных веществ. В результате были разработаны эффективные биологически активные препараты для биотехнологии (Биосин), медицины, растениеводства, животноводства, птицеводства и других областей. Совместно с Одесским НИИ глазных болезней и тканевой терапии Министерства здравоохранения УССР был разработан эффективный способ получения лекарственного средства Торфот для офтальмологии и гинекологии, выпускавшего заводом «Биостимулятор» (г. Одесса) и экспортного в 20 стран мира. Разработаны также способы получения противовирусных и противоопухолевых препаратов, защищенные авторскими свидетельствами СССР.

С использованием методов окислительно-гидролитической деструкции торфа, бурых углей, сапропелей и отходов растительного сырья в 1990-е годы разработаны технологии производства регуляторов роста растений Оксидат торфа, Гидрогумат, Оксигумат, Мальтамин, Мальтамин LX, Феномелан, Аминогумат. Производство большинства из них освоено на ряде промышленных установок и предприятий Беларуси, широко используется в агропромышленном комплексе республики и других отраслях.

На основе гуминовых регуляторов роста в содружестве с РУП «Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларусь» разработаны новые формы азотных, фосфорных, калийных и комплексных удобрений, включающие регуляторы роста Гидрогумат и Оксигумат. Технология производства гуматодержащего карбамида была внедрена на ОАО «ГродноАзот», которое в течение многих лет выпускало его в объеме 30–40 тыс. т в год.

Г. В. Наумова принимала активное участие в оценке торфяных отложений практически значимых торфяных месторождений Беларуси, в том числе месторождения «Туршевка – Чертово», где планировалось создание комбината по глубокой комплексной переработке торфа с получением новых продуктов и материалов.

В 2005–2010 гг. совместно НПЦ по животноводству НАН Беларуси и РУП «Институт экспериментальной ветеринарии имени С. Н. Вышелесского» разработаны технологии производства новых эффективных биологически активных кормовых добавок для животноводства и птицеводства Гумосил, Эколин, Ипан, повышающих продуктивность, иммунитет и сохранность поголовья животных.

В последние годы на основе продуктов окисления торфа разработаны и выпускаются УП «БелУниверсалПродукт» и ЧПУП «ЧервеньАГРО» эффективные импортозамещающие консерванты влажного зерна (Гумоплюс) и зеленых кормов (Консил-УНИ), пользующиеся спросом в хозяйствах республики. Применяются технологии производства обогащенного азотом регулятора роста растений Гуморост, гуматодержащего жидкого удобрения с микроэлеменами «Тезоро», пектинодержащей кормовой добавки ПКД, производство которых организовано на ЧПУП «ЧервеньАГРО».

Галиной Васильевной подготовлены 6 кандидатов наук, в результате чего в 2010 г. ей присвоено звание профессора. Творческий багаж юбиляра составляет 3 монографии, около 500 научных статей, отдельные из которых опубликованы за рубежом. Исследователь награждена медалью «Изобретатель СССР», так как является автором более 40 авторских свидетельств СССР, а также 17 патентов Республики Беларусь и 2 евразийских патентов.

Г. В. Наумова была неоднократно поощрена Почетными грамотами Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, концерна «Белнефтехим», Президиума Национальной академии наук Беларуси, Института торфа АН БССР и Института природопользования НАН Беларуси.

*Сердечно поздравляем Галину Васильевну с юбилеем! Желаем ей крепкого здоровья, неиссякаемой энергии и оптимизма!*

**С. А. Лысенко, А. Э. Томсон, Н. А. Жмакова,  
Н. Л. Макарова, Т. Ф. Овчинникова, А. А. Макеенко**

***К 70-летию Валерия Степановича Хомича***  
***To the 70th Anniversary of Valery Stepanovich Khomich***

Доктору географических наук, главному научному сотруднику лаборатории оптимизации геосистем Валерию Степановичу Хомичу 21 июля 2022 г. исполнилось 70 лет. Ученый глубоко предан науке и почти полвека занимается любимым делом. Валерий Степанович известен не только в Беларуси, но и за ее пределами, как специалист широкого профиля. Его работы по экологии городов, загрязнению окружающей среды, анализу и оценке природных и техногенных факторов, определяющих состояние городской среды, имеют большое научное, практическое и социальное значение. Комплексный геоэкологический анализ взаимодействия техногенных и природных процессов на территории городов, оценка качества городской среды, разработка научных основ экологически оптимального размещения геотехнических систем на территории Беларуси – эти и другие направления получили развитие благодаря исследованиям В. С. Хомича.

Научная деятельность Валерия Степановича началась в 1975 г. в Институте геохимии и геофизики АН БССР с момента его поступления в аспирантуру. Еще в студенчестве В. С. Хомичу посчастливилось проходить здесь практику, приобретая теоретические знания и неоценимый опыт работы в различных экспедициях. В последующем эти знания и экспедиционный опыт были многократно приумножены. Работа в этот период позволила собрать богатый фактический материал о трансформации природных ландшафтов в зоне воздействия одного из крупнейших в Беларуси химических комплексов и успешно защитить кандидатскую диссертацию в Ленинградском педагогическом университете имени А. И. Герцена.

В становлении молодого ученого неоценимую роль сыграли идеи его научного руководителя Александра Александровича Хомича, которые опирались на представления Б. Б. Попынова, М. А. Глазовской, П. И. Перельмана и других ученых о соподчиненности элементарных ландшафтов и их разной реакции на антропогенные воздействия. Огромное влияние на формирование кругозора, понимание взаимосвязи и взаимообусловленности природных процессов, отношение к науке, планирование исследований и многие другие качества исследователя оказала научная среда тех лет и многочисленные учителя, среди которых академики К. И. Лукашев, Г. И. Гарецкий, Р. Г. Гарецкий, члены-корреспонденты В. К. Лукашев и В. А. Кузнецов, известные геохимики В. А. Ковалев, Н. Н. Петухова, А. Л. Жуховицкая и др.

В. С. Хомич в науке прошел все ступени научного становления. С 1975 по 1990 г. работал инженером, младшим научным сотрудником, научным сотрудником, старшим научным сотрудником Института геохимии и геофизики АН БССР, в 1990–1991 гг. – старшим научным сотрудником Института проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси (теперь – Институт природопользования НАН Беларуси). В 1991 г. Валерий Степанович организовал и возглавил лабораторию экологии городов, а в 1994 г. – лабораторию оптимизации геосистем, которой руководил до 2018 г. В 2005–2020 гг. он работал заместителем директора института по научной работе. На данном посту В. С. Хомич проявил себя как организатор науки, пройдя этот путь с честью и достоинством. С февраля 2020 г. Валерий Степанович занимает должность главного научного сотрудника лаборатории оптимизации геосистем.

В 2006 г. В. С. Хомич успешно защитил докторскую диссертацию на тему «Геохимическая трансформация природной среды в городах Беларуси». Установленные в результате выполненных им исследований закономерности хемотрансформации природной среды в городах позволили существенно развить важное научное и практическое направление – экогеохимию городских ландшафтов.

Особого внимания заслуживают организаторские способности Валерия Степановича. Под его руководством и при непосредственном участии в 1980–2000 гг. выполнены детальные почвенно-геохимические съемки в Минске, Гомеле, Светлогорске, Солигорске, Пинске, Мозыре и других городах, обследованы зоны влияния ряда опасных производств и полигонов отходов. Тем самым В. С. Хомич внес значительный вклад в развитие теории и практики геохимии и геоэкологии городских ландшафтов, разработку научно-методических основ эколого-геохимических исследований городских ландшафтов. Им установлены закономерности формирования разнотипных геохимических аномалий урбанизированных территорий, а также наличие сходства пространственной структуры загрязнения почв приоритетными загрязнителями.

Научные результаты и опыт экспериментальных полевых исследований получили развитие в научно-прикладной деятельности Валерия Степановича, связанной с руководством и координацией



работ по крупным проектам, таким как Схема охраны окружающей среды г. Минска (2005–2006), проведение инженерно-экологических изысканий и разработка программы комплексного экологического мониторинга Белорусской АЭС (2012–2016), обоснование экологического каркаса и защитной зоны г. Минска в составе работ по корректировке генплана города (2015–2018), разработке прогноза состояния окружающей среды Беларусь и стратегии в области ее охраны на период до 2035 года (2019–2021). Он принимал активное участие в разработке концепции и структуры Государственной программы социально-экономического развития и комплексного использования природных ресурсов Припятского Полесья на 2009–2015 годы, а также координировал исследования по его научному сопровождению.

Актуальность и востребованность разработок В. С. Хомича подтверждается их использованием при подготовке ряда важнейших документов, определяющих природоохранную политику на национальном и региональном уровнях: Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2020 года; Прогноза изменения окружающей среды и комплекса мероприятий с целью обеспечения экологической безопасности Республики Беларусь на 2010–2020 годы; Национального плана выполнения обязательств, принятых Республикой Беларусь по Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях на 2007–2010 годы и на период до 2028 года; Стратегического плана устойчивого развития г. Минска до 2020 года. Результаты эколого-геохимических исследований г. Минска положены в основу экологической политики при корректировке Генерального плана города, разработке нормативных технических документов, касающихся мониторинга загрязненных земель и обращения с загрязненными территориями, более десяти из которых утверждены и введены в действие Минприроды Республики Беларусь и Госстандартом Республики Беларусь.

Валерий Степанович проводит большую научно-организационную работу в области геоэкологии и природопользования, включая проведение различных международных конференций и семинаров. Он активно работает в качестве члена Объединенного научного совета по фундаментальным географическим проблемам при Международной ассоциации академий наук, был одним из организаторов научных заседаний этого совета в Раубичах (1998), Минске (2009) и Гродно (2019). В разные годы участвовал в работе Экологической комиссии при Президиуме Академии наук Беларусь, в составе экспертных комиссий Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Государственного комитета по науке и технологиям. Много лет был членом Ученого совета Белорусского географического общества. Он является заместителем главного редактора журнала «Природопользование», членом редколлегий журналов «Известия Российской академии наук. Серия географическая», «Земля Беларусь», «Природные ресурсы».

Научные работы В. С. Хомича изданы в ряде престижных научных изданий и журналов. Он является автором и соавтором более 10 монографий и 300 научных работ, а также ряда экологических научно-информационных изданий.

Валерий Степанович уделяет пристальное внимание подготовке кадров высшей квалификации. Под его руководством защищены 3 кандидатские диссертации и как минимум 2 работы готовятся к защите. В. С. Хомич неоднократно являлся оппонентом диссертационных работ, консультантом многих соискателей ученых степеней, членом экспертного совета Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь, а сейчас он – член двух советов по защите докторских и кандидатских диссертаций. На протяжении ряда лет Валерий Степанович является председателем комиссий по аттестации аспирантов и соискателей в Институте природопользования НАН Беларуси.

В. С. Хомич – лауреат премии Национальной академии наук Беларусь (2013). Он награжден Почетной грамотой Совета Министров Республики Беларусь (2003), нагрудным знаком «Юбілейны медаль» в честь 80-летия НАН Беларусь (2010), почетной грамотой Президиума НАН Беларусь (2012). В 2009 г. получил благодарность Министра природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь (2009).

Трудолюбие Валерия Степановича, его организаторские способности, высокий профессионализм и ответственность, интеллигентность и доброжелательность – эти и другие личные качества вызывают искреннее уважение к нему не только у коллег и друзей, но и у всех, с кем он работает и сотрудничает.

В настоящее время Валерий Степанович готовит к изданию очередную коллективную монографию, посвященную прогнозу состояния окружающей среды Беларуси.

*Искренне поздравляем Валерия Степановича с юбилеем! Желаем ему дальнейших творческих успехов в развитии географической науки, а также энтузиазма и неиссякаемой энергии для новых научных поисков и осуществления задуманного!*

**В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, Т. И. Кухарчик,  
С. В. Какарека, Г. А. Камышенко, Л. А. Кравчук**

**ПАМЯТИ УЧЕНОГО**  
**MEMORY OF A SCIENTIST**

**Член-корреспондент Ромма Ефимович Айзберг  
(16.06.1933–19.05.2022)**

**Correspondent Member Romma Efimovich Aizberg  
(16.06.1933–19.05.2022)**



19 мая 2022 г. ушел из жизни доктор геолого-минералогических наук, профессор, лауреат Государственной премии БССР, лауреат премии имени академика В. А. Коптюга Сибирского отделения Российской академии наук, лауреат премии Национальной академии наук Беларусь, главный научный сотрудник Института природопользования НАН Беларусь, член-корреспондент Ромма Ефимович Айзберг.

Ромма Ефимович родился в г. Артёмовске (теперь – Бахмут) Донецкой области (Украина), где прошли детство и юность ученого.

В 1951 г., окончив среднюю школу с золотой медалью, Р. Е. Айзберг поступил на геологоразведочный факультет Новочеркасского политехнического института, после окончания которого был направлен на работу в Ростовское отделение треста «Росгеоразведка». С 1957 по 1964 г. профессиональная судьба связала Ромму Ефимовича с Юго-Восточной Каракумской экспедицией Управления геологии при Совете Министров Туркменской ССР, где он осуществлял геологическую съемку юго-западных отрогов Гиссарского хребта и территории Туранской плиты. В 1959–1964 гг. Р. Е. Айзберг занимался анализом и обобщением геолого-геофизических материалов, в том числе по результатам бурения опорных, параметрических и картировочных скважин.

Еще одним направлением работ Роммы Ефимовича стали исследования по региональной тектонике, в результате которых им было разработано тектоническое районирование мегантиклинали юго-западного Гиссара, впервые выполнено системное описание тектоники Юго-Восточных Каракумов, охарактеризована структура и особенности развития крупнейшего Репетекского глубинного разлома.

В 1963 г. Р. Е. Айзберг успешно защитил кандидатскую диссертацию, посвященную геологическому строению и перспективам нефтегазоносности юго-восточного Туркменистана.

В 1965 г. Ромма Ефимович приехал в Беларусь и стал работать в Белорусском научно-исследовательском геологоразведочном институте (БелНИГРИ). Так начался белорусский этап его профессиональной деятельности, связанный с изучением тектоники, региональной и нефтяной геологии территории Беларусь и сопредельных регионов Восточно-Европейской платформы.

Р. Е. Айзбергом совместно с З. А. Гореликом, А. М. Синичкой и В. Н. Макаревичем за короткое время был разработан новый подход к изучению тектоники Припятского прогиба и опубликована монография «Современная структура и история тектонического развития Припятской впадины» (1968), послужившая базой для нефтегеологического районирования Припятского прогиба и основой для проектирования нефтеисковых работ.

В последующий период (1969–1974 гг.) Ромма Ефимович совместно с другими геологами обосновал палеотектонические модели чехла запада Восточно-Европейской платформы, основные этапы эволюции региона на формационной основе, особенности формирования состава доплитных и плитных комплексов чехла. В результате была создана тектоническая карта Беларусь и смежных территорий масштаба 1 : 500 000 с опубликованием монографии «Тектоника Белоруссии» (1978), где перву Р. Е. Айзберга совместно с коллегами принадлежат основные разделы по формациям и структурам платформенного чехла. За создание Тектонической карты Белоруссии (гл. редактор Р. Г. Гарецкий, зам. гл. редактора Р. Е. Айзберг) и написание монографии «Тектоника Белоруссии» Ромма Ефимович вместе с группой ученых и геологов-практиков был удостоен Государственной премии БССР (1978).

В 1976 г. Р. Е. Айзберг защитил в Московском государственном университете докторскую диссертацию на тему «Структуры и формации чехла запада Русской плиты и их эволюция». В 1980–1984 гг. Ромма Ефимович работал в составе группы советских геологов в Центральном геологическом институте Министерства геологии ГДР (г. Берлин). После возвращения из Германии он продолжил трудиться заведующим сектором тектоники БелНИГРИ, а в 1990 г. перешел на работу в Академию наук БССР,

став главным научным сотрудником Института геологических наук. В 1989 г. Высшей аттестационной комиссией СССР Р. Е. Айзбергу было присвоено ученое звание профессора по специальности «геотектоника».

Со второй половины 1980-х годов ведущим направлением в научной деятельности Роммы Ефимовича стало изучение проблем геодинамики запада Восточно-Европейской платформы. В 1986 г. Р. Е. Айзберг разработал новую геодинамическую модель развития Припятского палеорифта и развил ее в дальнейшем в серии публикаций, подготовленных совместно с Т. А. Старчик (1991, 1995, 1997, 2001). В это же время он опубликовал работы, посвященные палеогеодинамике позднего протерозоя и фанерозоя территории Беларуси и сопредельных регионов, развил теоретические представления о листрической делимости земной коры платформ.

Со второй половины 1990-х годов заметное место в исследованиях Роммы Ефимовича заняли проблемы сейсмотектоники и неогеодинамики. Вместе с коллегами ученый опубликовал ряд статей, посвященных сейсмотектоническому и неотектоническому районированию запада Восточно-Европейской платформы и Центральной Европы, обоснованию выделения зон возможных очагов землетрясений.

Важнейшая часть научных исследований Р. Е. Айзberга в Беларуси связана с изучением проблем нефтегазоносности. Разработанные при его ведущем участии карты нефтегеологического районирования Припятского палеорифтового бассейна (1968, 1972, 1988) и карта нефтегеологического районирования Беларуси (1999) были и остаются основой планирования нефтепоисковых работ в стране. Ромма Ефимович особенно активизировал это направление исследований в последние годы работы, когда им были созданы: карты структурного районирования подсолевого и межсолевого комплексов Припятского прогиба для решения задач эффективного освоения ресурсов углеводородов масштаба 1 : 200 000 (совместно с В. Н. Бескопыльным и Я. Г. Грибком; 2011); серия карт по подсолевому и межсолевому комплексам Припятского прогиба по условиям нефтегазообразования, по условиям формирования залежей углеводородов масштаба 1 : 200 000 (2012). Важным итоговым результатом этого направления исследований стала вышедшая под редакцией Р. Е. Айзберга и Я. Г. Грибика монография «Нетрадиционные источники углеводородного сырья в недрах Беларуси: геологические аспекты» (2022), изданная за несколько месяцев до ухода из жизни Роммы Ефимовича.

Р. Е. Айзберг принял активное участие в исследованиях по таким крупным международным научным проектам, как «Евробридж», «Неогеодинамика депрессии Балтийского моря и сопредельных областей» (проект 346 Международной программы геологической корреляции), «Нефтегазоносность верхнепротерозойских и палеозойских комплексов Беларуси и Сибири», Георифт-2013. Результаты этих исследований внесли важный вклад в изучение литосферы западной части Восточно-Европейской платформы, проблем неогеодинамики Центральной Европы, а также в сравнительный нефтегеологический анализ Восточно-Европейской и Сибирской платформ. Научным итогом этих работ помимо многочисленных статей явились: новая модель строения литосферы территории Беларуси; новая неотектоническая карта Центральной Европы, составленная Р. Е. Айзбергом совместно с Р. Г. Гарецким, Э. А. Левковым, А. К. Карабановым, В. П. Палиенко и геологами Германии, Польши, России, Дании, Литвы; оценка генетических связей неотектонических структур с глубинным строением региона; методы выявления условий нефтегазообразования в разнотипных платформенных структурах.

Весомым достижением фундаментальных геологических исследований является созданная геолого-геофизическая модель глубинного строения земной коры и верхней мантии Припятского и Днепровского палеорифтовых нефтегазоносных бассейнов по результатам изучения вдоль международного профиля глубинного сейсмического зондирования Георифт-2013. Ромма Ефимович как соавтор созданной модели совместно со специалистами Беларуси, Украины, Польши, Финляндии и Дании обосновал важное направление минерагенических исследований и последующих геологоразведочных работ. Работа за авторством белорусской части проекта – Р. Е. Айзберга, Р. Г. Гарецкого, Я. Г. Грибика, Г. И. Карапаева – по итогам конкурса 2018 г. вошла в топ-10 в области фундаментальных и прикладных исследований НАН Беларуси.

Р. Е. Айзберг – автор более 450 опубликованных научных работ, в том числе 27 монографий. Им разработаны курсы лекций «Геология нефти и газа» и «Учение о геологических формациях», которые ученый читал студентам-геологам Белорусского государственного университета. Под его руководством защищены 1 докторская и 7 кандидатских диссертаций. Научные заслуги Роммы Ефимовича отмечены избранием его членом-корреспондентом Национальной академии наук Беларуси (2000).

Многих людей привлекали такие качества Р. Е. Айзберга, как увлеченность геологией, высокая культура, энциклопедические знания, доброжелательность, готовность прийти на помощь. Именно благодаря им Ромма Ефимович смог стать одним из лидеров геологической науки Беларуси, приобрел широкую известность и заслуженный авторитет как в нашей стране, так и далеко за ее пределами.

Глубоко скорбим в связи с кончиной Роммы Ефимовича Айзберга. Выражаем искренние соболезнования его родным и близким. Бережно храним светлую память об этом неутомимом и талантливом исследователе недр и незаурядном человеке.

**Коллеги, друзья, редколлегия**

---

**Александр Кириллович Карабанов (1958–2019)**

**К 70-летию со дня рождения**

**Alexander Kirillovich Karabonov (1958–2019)**

**To the 70<sup>th</sup> of the birth**



25 октября 2022 г. исполнилось 70 лет со дня рождения А. К. Карабанова – крупного белорусского ученого-геолога и организатора науки, специалиста в области четвертичной геологии и палеогеографии, геоморфологии, новейшей тектоники и неогеодинамики, доктора геолого-минералогических наук, профессора, академика Национальной академии наук Беларуси.

Александр Кириллович родился в г. Минске, окончил специализированную среднюю школу № 24, во время обучения в которой приобрел знания основ естественнонаучных дисциплин и на высоком уровне овладел немецким языком. В 1969 г. А. К. Карабанов поступил на географический факультет Белорусского государственного университета имени В. И. Ленина. В студенческие годы Александр Кириллович принимал участие в организованных профессором О. Ф. Якушко экспедициях по изучению озер Белорусского Полесья, а также в сезонных полевых геологических работах под руководством академика АН БССР Г. И. Горецкого. А. К. Карабанов с отличием окончил университет в 1974 г. и сразу же поступил в очную аспирантуру Института геохимии и геофизики АН БССР, в которой под научным руководством профессора Э. А. Левкова занимался изучением закономерностей строения новейших геологических формаций, ледникового седименто- и морфогенеза, гляциотектоники. Итогом этих исследований стала защита им в 1983 г. кандидатской диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. В 1991 г. Александру Кирилловичу присвоено ученое звание старшего научного сотрудника, а в 1992 г. он возглавил лабораторию геологии и геодинамики Института геологических наук НАН Беларуси.

В последующие годы А. К. Карабанов занимался изучением вопросов неотектоники и неогеодинамики территории Беларуси и смежных регионов Восточно-Европейской платформы в тесном сотрудничестве с академиками Р. Г. Горецким и А. В. Матвеевым, членом-корреспондентом Р. Е. Айзбергом, профессором Э. А. Левковым и зарубежными учеными. В этом научном направлении Александр Кириллович достиг значительных результатов. В ходе реализации проекта № 346 Международной программы геологической корреляции ЮНЕСКО «Неогеодинамика депрессии Балтийского моря и прилегающих областей» (1994–1997 гг.) им была разработана оригинальная комплексная методика реконструкции амплитуд неотектонических движений в области древнематерикового оледенения, сформулирована концепция неотектонической эволюции и неогеодинамики территории Беларуси и смежных областей западного сектора Евразийской литосферной плиты. Кроме того, А. К. Карабановым было проведено неотектоническое районирование Западной и Центральной Европы, выделены главные геодинамические факторы, определявшие характер геологических процессов в новейшее время. Александр Кириллович предложил методику составления неотектонических карт на основе картографирования структурно-формационных комплексов платформенного чехла. Результатом выполненных исследований явилась защита им в 2002 г. диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук на тему «Неотектоника Беларуси». Эта работа получила высокую оценку геологов нашей страны, а также коллег из России, Украины, Польши и стран Прибалтики, и легла в основу двух монографий.

В 2004 г. А. К. Карабанов был избран членом-корреспондентом Национальной академии наук Беларуси, а в 2014 г. – академиком; в 2011 г. ему было присвоено ученое звание профессора по специальности «геология». С 2008 по 2019 г. Александр Кириллович возглавлял Институт природопользования НАН Беларуси и созданную в его структуре лабораторию геодинамики и палеогеографии. В это период, несмотря на большую занятость организационной деятельностью, он

продолжал активно вести научные исследования, а также был вовлечен в педагогический процесс, более 20 лет проработав по совместительству в должности профессора кафедры динамической геологии Белорусского государственного университета. Под руководством А. К. Карабанова выполнен комплекс научно-исследовательских работ, связанных с обоснованием выбора площадки для размещения Белорусской АЭС, разработаны прогноз и основы формирования стратегии изучения и освоения минерально-сырьевых ресурсов Беларуси. В последние годы Александр Кириллович уделял пристальное внимание радоновой проблематике. Совместно с академиком А. В. Матвеевым и М. И. Автушко им были: изучены особенности распределения на территории Беларуси объемной активности радона в наиболее распространенных типах четвертичных отложений и коренных пород платформенного чехла и кристаллического фундамента; выделены радоновые аномалии в приповерхностных отложениях, построена схема районирования территории Беларуси по степени радоновой опасности; обоснованы мероприятия по минимизации возможного негативного влияния радоновых аномалий на геоэкологическую обстановку, разработаны рекомендации по проведению постоянного мониторинга объемной активности радона и состояния здоровья населения в наиболее радиоопасных зонах.

А. К. Карабанов являлся организатором и научным руководителем Государственной программы социально-экономического развития и комплексного использования природных ресурсов Припятского Полесья (2010–2015 гг.), государственной целевой программы «Мониторинг полярных районов Земли и обеспечение деятельности арктических и антарктических экспедиций» (2011–2015 гг.), государственных программ научных исследований «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал» (2011–2015 гг.), государственной программы научных исследований «Природопользование и экология» на 2016–2020 годы и др.

Результаты творческой деятельности Александра Кирилловича изложены в более чем 400 научных и научно-популярных публикациях, в том числе 30 монографиях и других изданиях, отражены в 50 картах геологического содержания. А. К. Карабановым подготовлен кандидат наук.

Плодотворная научная деятельность Александра Кирилловича получила общественное признание. Он был награжден медалью «За трудовую доблесть» (1973), Премией Национальной академии наук Беларусь за цикл работ «Разломы земной коры Беларуси: теоретические и прикладные аспекты» (2008), медалью Франциска Скорины (2018), нагрудным знаком Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь «Ганаровы эколаг» (2019), многочисленными грамотами, в его адрес составляли благодарственные письма.

Уже прошло более трех лет, как Александра Кирилловича Карабанова нет с нами. Его отличали доброжелательность, широкая эрудированность, интеллигентность, добродушие, отзывчивость. Таким его запечатлели в памяти друзья, коллеги и ученики.

*Р. Г. Гарецкий, А. В. Матвеев, А. А. Махнач, Я. Г. Грибик,  
Е. А. Кухарик, В. С. Хомич, Г. А. Камышенко, Т. Б. Рылова*

**ХРОНИКА**  
**CHRONICS**

**ИТОГИ IV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«ПРИРОДНАЯ СРЕДА АНТАРКТИКИ: МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ПОДХОДЫ  
К ИЗУЧЕНИЮ», ПОСВЯЩЕННОЙ 15-ЛЕТИЮ СОЗДАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ «РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ЦЕНТР ПОЛЯРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»**

**RESULTS OF THE IV INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE  
"THE NATURAL ENVIRONMENT OF ANTARCTICA: CROSS-DISCIPLINARY STUDY  
APPROACHES" DEDICATED TO THE 15th OF THE STATE INSTITUTION  
"REPUBLICAN CENTER FOR POLAR RESEARCH"**

21–23 сентября 2022 г. на базе Государственного природоохранного учреждения «Березинский биосферный заповедник» состоялась IV Международная научно-практическая конференция «Природная среда Антарктики: междисциплинарные подходы к изучению», посвященная 15-летию создания государственного учреждения «Республиканский центр полярных исследований». Организаторами конференции выступили Институт природопользования НАН Беларуси, ГУ «Республиканский центр полярных исследований» и ГНПО «НПЦ НАН Беларусь по биоресурсам».



Участники IV Международной научно-практической конференции  
«Природная среда Антарктики: междисциплинарные подходы к изучению»

Participants IV International scientific and practical conference  
"The natural environment of Antarctica: cross-disciplinary study approaches"

В адрес оргкомитета конференции поступило более 70 научных докладов, предоставленных учеными научных организаций НАН Беларуси (Института природопользования НАН Беларуси, ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам», Института физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси, ГУ «Республиканский центр полярных исследований», Физико-технического института НАН Беларуси, Института прикладной физики НАН Беларуси, Института микробиологии НАН Беларуси, Центра геофизического мониторинга НАН Беларуси), Белорусского государственного университета (географического и биологического факультетов, Национального научно-исследовательского центра мониторинга озоносферы БГУ).

В конференции также приняли участие ученые из ряда научных учреждений и учебных заведений Российской Федерации: ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ФГБУ «ААНИИ», г. Санкт-Петербург), ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И. С. Грамберга» (ФГБУ «ВНИИОкеангеология» г. Санкт-Петербург), ФГБУО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАИК г. Москва), Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ» г. Керчь, Крым), Санкт-Петербургского государственного университета, Институт леса имени В. Н. Сукачёва (ИЛ СО РАН г. Красноярск), Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН (г. Санкт-Петербург), ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (ФГБОУ ГГИ г. Санкт-Петербург), Ботанический институт имени В. Л. Комарова РАН (БИН РАН г. Санкт-Петербург), Институт нефтегазовой геологии и геофизики (ИНГГ СО РАН г. Новосибирск), Институт математических проблем биологии РАН (ИМПБ РАН – филиал ИПМ имени М. В. Келдыша РАН г. Пущино), Музей антропологии и этнографии имени Петра Великого (Кунсткамера) РАН (г. Санкт-Петербург) и других организаций.

Ученые из Полярного научно-исследовательского института (г. Стамбул, Турция) направили на конференцию доклад, в котором отражены результаты, полученные в ходе выполнения научного проекта «Определение органических загрязнителей в прибрежной зоне Восточной Антарктики», в реализации которого приняли непосредственное участие члены 14-й Белорусской антарктической экспедиции.

Всего в конференции участвовало более 60 человек. Перед ее началом была организована выставка, отражающая деятельность ученых Республики Беларусь в Антарктике.

Открыли работу конференции начальник ГУ «Республиканский центр полярных исследований» НАН Беларуси В. А. Рыжиков и директор Института природопользования НАН Беларуси С. А. Лысенко. Гостей и участников конференции приветствовал генеральный директор ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам» А. И. Чайковский и директор ГПУ «Березинский биосферный заповедник» А. М. Прокошин.

На открытии и пленарном заседании конференции были представлены доклады ведущих специалистов Республики Беларусь и Российской Федерации. С приветственным словом выступили Заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси академик А. И. Кильчевский, который поздравил коллектив ГУ «Республиканский центр полярных исследований» с юбилеем и зачитал приветственный адрес Председателя Президиума НАН Беларуси академика В. Г. Гусакова, в котором были отмечены важность и высокая значимость поставленных и реализуемых коллективом ГУ «Республиканский центр полярных исследований» задач.

Академик НАН Беларуси В. Ф. Логинов в своем докладе отразил основные этапы становления и развития Национальной государственной антарктической программы и отметил, что впервые вопрос об организации полярных исследований Республикой Беларусь официально обсуждался на совещании у Председателя Президиума НАН Беларуси М. В. Мясниковича в июне 2005 г. После консультаций с руководством Росгидромета, Арктического и антарктического научно-исследовательского института, было направлено письмо Президенту Республики Беларусь А. Г. Лукашенко, который одобрил предложение НАН Беларуси по участию белорусских ученых в исследованиях в полярных регионах Земли и поручил Правительству Республики Беларусь разработать и утвердить комплексный план мероприятий по исследованию и использованию полярных регионов Земли. Первая Государственная целевая программа была утверждена Советом Министров 31 августа 2006 г.

Директор Института природопользования НАН Беларуси С. А. Лысенко в своем докладе сообщил о важнейших результатах и перспективных направлениях научных исследований в Антарктике и подчеркнул, что в последнее десятилетие белорусские ученые сделали колossalный прорыв в вопросах исследования «ледового континента»: создана антарктическая станция наблюдения за атмосферным аэрозолем, которая вошла в международную сеть радиометрического зондирования аэрозоля AERONET; разработаны методы и оборудование для измерения вертикальных профилей содержания малых газовых компонентов атмосферы; выполнена интерпретация геофизических полей и типизация глубинного строения литосферы, оценен вещественный состав кристаллического фундамента и дан прогноз наличия месторождений полезных ископаемых. Итогом многолетних исследований, проводимых белорусскими биологами, стало создание базы данных обнаруженных организмов в пределах морских пресноводных и наземных экосистем с указанием их видовой принадлежности, морфоструктурных и генетических особенностей. В рамках исследования антропогенного воздействия на окружающую среду Антарктику разработана модель переноса загрязняющих веществ

в атмосфере и рассчитано комплексное воздействие на подстилающую поверхность выбросов от стационарных источников за последние 30 лет.

Начальник Республиканского центра полярных исследований В. А. Рыжиков озвучил основные итоги создания Белорусской антарктической станции «Гора Вечерняя», расположенной в Восточной Антарктиде, и оснащения станции научным оборудованием, современными системами жизнеобеспечения, транспорта, навигации и связи. Отметил, что высокие оценки и положительные отзывы о деятельности Республики Беларусь по созданию полярной инфраструктуры и природоохранной деятельности в Антарктике содержатся в итоговом отчете австралийской инспекции, посетившей нашу станцию в 2020 г. Озвучил дальнейшие планы и перспективы развития Белорусской антарктической станции, отметил большой вклад в развитие и становление Республиканского центра полярных исследований своих предшественников – О. А. Сморчкова, В. И. Филимонова, О. В. Снытина, И. М. Пильщикова, А. А. Гайдашова.

Начальник Белорусской антарктической экспедиции А. А. Гайдашов в своем выступлении детально отразил основные этапы создания ГУ «Республиканский центр полярных исследований», продемонстрировал ряд архивных документов, которые предшествовали созданию центра. Доложил основные итоги логистической, экспедиционной и международной деятельности, осуществляющейся Республикой Беларусь в рамках Договора об Антарктике и Протокола об охране окружающей среды Антарктики. Озвучил дальнейшие планы экспедиционной деятельности и предстоящей работы по получению нашей страной статуса Консультативной Стороны Договора об Антарктике.

Руководитель отдела взаимодействия с органами управления Системы Договора об Антарктике Российской антарктической экспедиции Федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» Лукин Валерий Владимирович в своем докладе «Перспективы и проблемы новых консультативных сторон Договора об Антарктике в получении этого статуса» отметил, что в настоящее время Венесуэла, Канада, Турция, Колумбия и Республика Беларусь являются основными претендентами на получение статуса Консультативной Стороны Договора об Антарктике. Выразил мнение, что лучшие перспективы в этом направлении есть у Республики Беларусь, однако достижение консенсуса по данному вопросу, из-за существенной политизации консультативных совещаний, требует значительной подготовительной работы.

Работа конференции продолжилась на следующий день в рамках пяти секционных заседаний. Выступающие представили доклады, посвященные различным направлениям научных исследований, проводимых в Антарктике, таким как: экологические проблемы и охрана природной среды; изучение биоты; медико-биологические исследования и проблемы профилактики заболеваний полярников; климатические, метеорологические и аэрокосмические исследования; геологические, геофизические, гляциологические и палеогеографические исследования; разработка приборно-технической базы для проведения научных исследований; антарктическая логистика, инфраструктура, безопасность; правовые аспекты деятельности в системе Договора об Антарктике.

На третий, завершающий, день конференции была организована пешеходная экскурсия по уникальным экологическим маршрутам ГПУ «Березинский биосферный заповедник», в ходе которой участники конференции смогли познакомиться с живописными объектами нетронутой белорусской природы.

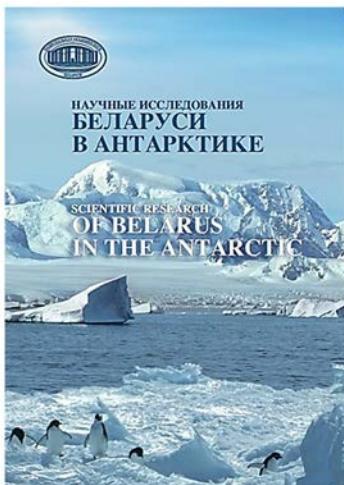
Конференция позволила подвести итоги предыдущего пятилетнего этапа проведения Республикой Беларусь исследований в Антарктике, обсудить новейшие мировые достижения в данной области, оценить результаты проводимых в нашей стране исследований по различным научным направлениям, уточнить перспективы их дальнейшего развития. Также конференция показала необходимость и востребованность международных научных контактов (к сожалению, приостановленных в течение периода распространения коронавирусной инфекции) с целью обмена опытом и консолидации усилий ученых по изучению и популяризации знаний об уникальном континенте нашей планеты, который является Антарктида. Участниками было высказано общее мнение о необходимости проведения такого рода конференций как минимум через каждые два года.

К началу конференции был издан сборник представленных на ней докладов: Природная среда Антарктики: междисциплинарные подходы к изучению : сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Государственного учреждения «Республиканский центр полярных исследований», Домжерицы, 21–23 сентябрь 2022 г. / редкол.: В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. А. Рыжиков, Ю. Г. Гигиняк. – Минск : БГТУ, 2022. – 284 с.



**С. А. Лысенко, В. А. Рыжиков, М. А. Кудревич**

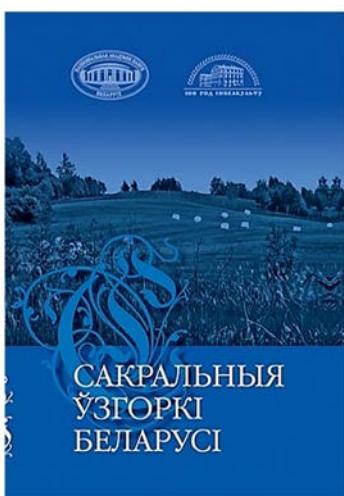
## НОВИНКИ ЛИТЕРАТУРЫ NEW LITERATURE



**Научные исследования Беларуси в Антарктике / В. Ф. Логинов [и др.]; под ред. В. Ф. Логинова. – Минск : Беларуская навука, 2021. – 176 с.**

В книге представлены основные результаты научных исследований, выполненных учеными Беларуси в Антарктике начиная с 2006 г. Приведена краткая информация об истории развития исследований, создания правового обеспечения деятельности в Антарктике, основных направлениях исследований в рамках Антарктических государственных программ, а также о международной деятельности Республики Беларусь в рамках Договора об Антарктике. Охарактеризовано состояние строительства Белорусской антарктической станции в оазисе Вечернем (Земля Эндерби, Восточная Антарктика). Изложены результаты наземных и спутниковых исследований атмосферы, земной поверхности и атмосферных процессов в Антарктике, изучения геофизических полей, мониторинга окружающей среды и оценки воздействия, а также биологических исследований.

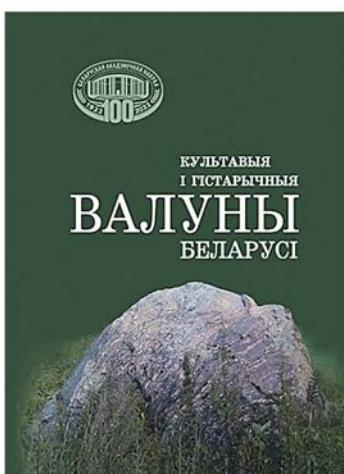
Книга предназначена для специалистов, занимающихся изучением полярных регионов Земли, а также историей развития исследований в Антарктике.



**Сакральныя ўзгоркі Беларусі / В. Ф. Вінакураў [і інш.]; навук. рэд.: С. П. Віцязь. – Мінск : Беларуская навука, 2021. – 268 с.**

У калектывай манаграфії ўзгоркі Беларусі паказаны ў комплексным кантэксьце: як прыродныя ландшафтныя аб'екты і як своеасаблівая этнакультурная прастора ў міфалагічнай і рытуальнай традыцыях. Абагульняецца інфармацыя пра каля тысячы сакральных пагоркаў, сабраная па гістарычнай, геалагічнай, краязнаўчай літаратуре, па архіўных даных, і ў час асабістых экспедыцый за апошнія дзесяцігоддзі. Разглядаюцца ўзвышшы, звязаныя з міфалагічнымі персанажамі, хрысціянскімі святымі, гістарычнымі асобамі і воінамі-чужынцамі, згадваюцца легенды пра скарбы і прывіды. Расказваецца пра ўзгоркі, дзе, паводле паданняў, «праваліўся храм». Асаблівая ўвага надаецца Святым і Лысым горам, якія шырока распаўсюджаны ў Беларусі.

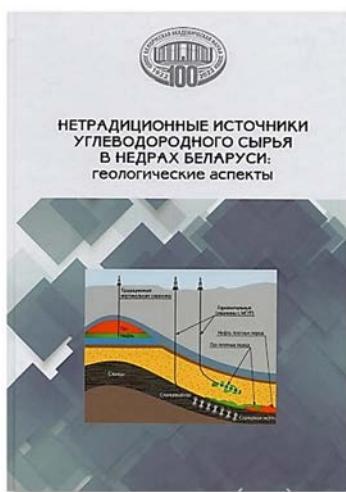
Кніга будзе карыснай для спецыялістаў у галіне прыродакарыстання і аховы прыроднай і гісторыка-культурнай спадчыны, а таксама для шырокага кола чытачоў.



**Культавыя і гістарычныя валуны Беларусі / А. К. Карабанаў [і інш.]; Нацыянальная акадэмія навук Беларусі, Інстытут прыродакарыстання. – 2-е выд., дап. і перапрац. – Мінск : Беларуская навука, 2022. – 404 с.**

Кніга прысвечана актуальнай праблеме выяўлення і вывучэння на тэрыторыі Беларусі валуноў – адметных прыродных аб'ектаў, помнікаў язычніцкіх і хрысціянскіх культатаў, з якімі звязаны легенды, паданні, розныя гістарычныя звесткі. Прыведзены апісанні больш за 500 камянёў, дадзена іх геалагічная і этнаграфічная характеристыка.

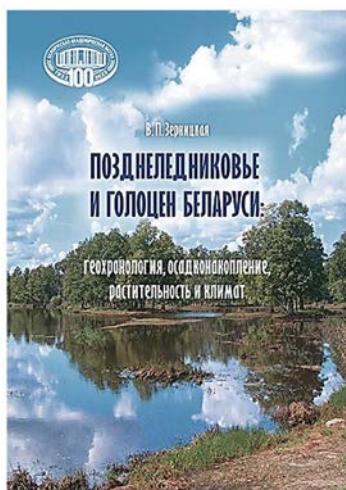
Прызначана для спецыялістаў у галіне прыродакарыстання, гісторыкаў, археолагаў, даследчыкаў народнай культуры, а таксама для шырокага кола чытачоў.



**Нетрадиционные источники углеводородного сырья в недрах Беларуси: геологические аспекты / Р. Е. Айзберг [и др.] ; под общ. ред. Р. Е. Айзberга, Я. Г. Грибика ; Национальная академия наук Беларуси, Институт природопользования ; Производственное объединение «Белоруснефть». – Минск : Беларуская навука, 2022. – 332 с.**

Представлены оценка потенциала нетрадиционных источников углеводородного сырья в недрах Беларуси, направления геолого-разведочных работ на перспективу путем анализа геологических, геофизических и геохимических данных в Припятском, Оршанском, Подлясско-Брестском бассейнах на основе изучения структурно-вещественных характеристик низкопроницаемых формаций с рассеянной (дискретной) битуминозностью, а также структур с тяжелыми нефтями. Приводятся научные выводы относительно широкого развития в девонских отложениях Припятского прогиба низкопроницаемых нефтеперспективных полуколлекторов.

Предназначена для научных сотрудников и специалистов, работающих по направлениям соответствующего профиля.



**Зерницкая, В. П. Позднеледниковые и голоцен Беларуси: геохронология, осадконакопление, растительность и климат / В. П. Зерницкая ; под ред. А. В. Матвеева. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 303 с.**

В книге представлены палеореконструкции (климат, растительность, особенности осадконакопления) динамики окружающей среды в позднеледниковые и голоцене на территории Беларуси. Полученные результаты основаны на детальном изучении отложений (озерных, болотных, аллювиальных) в разрезах, расположенных в различных районах страны с применением многопрофильного подхода, включающего спорово-пыльцевые исследования, определение  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^{14}\text{C}$ , органического вещества, минеральной составляющей,  $\text{CaCO}_3$  и др. Новые данные позволили установить хронологию накопления и палинологические признаки слоев нарочанского подгоризонта (позднеледниковые) и судобльского горизонта (голоцен), определить природные маркеры, отражающие климатические события, выявленные по изотопно-кислородным данным в ледяных кернах Гренландии; провести ландшафтно-климатические реконструкции и выделить этапы антропогенного воздействия на лесные экосистемы; построить пыльцевые карты, которые иллюстрируют пространственно-временную динамику древесных пород за последние 15 000 лет, определить этапы и пути их миграции в пределы Беларуси.

Книга адресована широкому кругу специалистов в области географии, геологии, климатологии, археологии и лимнологии. Результаты исследований могут использоваться при чтении лекций по палеогеографии в вузах страны.



**Природная среда Антарктики: междисциплинарные подходы к изучению : сб. материалов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Государственного учреждения «Республиканский центр полярных исследований», Домжерицы, 21–23 сент. 2022 г. / редкол. : В. Ф. Логинов [и др.]. – Минск : БГТУ, 2022. – 284 с.**

В сборник включены доклады IV-й Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Государственного учреждения «Республиканский центр полярных исследований» (21–23 сентября 2022 года; на базе Государственного природоохранного учреждения «Березинский биосферный заповедник», пос. Домжерицы, Витебская область, Республика Беларусь).



**Гирин, Р. Э. Тектоно-геодинамический анализ мощности земной коры запада Восточно-Европейской платформы / Р. Э. Гирин. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 110 с.**

В монографии приведены результаты многолетних исследований глубинного строения литосферы территории Белорусско-Прибалтийского региона. Построена трехмерная модель его консолидированной земной коры, опирающаяся на данные международных профилей ГСЗ-КМПВ: EUROBRIDGE-95, -96, -97; POLONAISE-97 P4; CELEBRATION-2000 CEL05 и GEORIFT-2013. Изложены результаты тектоно-геодинамического анализа распределения мощности земной коры запада Восточно-Европейской платформы. Установлены закономерности пространственного размещения разнотипных блоков консолидированной коры, различающихся мощностью и соотношением основных слоев. Показана связь щитов и региональных структур платформенного чехла с суммарной мощностью и разнотипной блоковой делимостью консолидированной коры. Установлены три главных типа соотношений мощности консолидированной коры и платформенного чехла для региональных тектонических структур запада Восточно-Европейской платформы.

Адресуется геофизикам и геологам научных и производственных организаций, а также аспирантам, магистрантам и студентам учебных заведений.



**Академик А. К. Карабанов / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природоиспользования, Центр. науч. б-ка им. Якуба Коласа : сост.: В. С. Хомич, Я. Г. Грибик. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 145 с. – (Люди белорусской науки).**

В издании отражены основные результаты научной, научно-педагогической и организационной деятельности академика НАН Беларуси, доктора геолого-минералогических наук, профессора А. К. Карабанова. Указаны наиболее важные вехи в жизни, приведен библиографический указатель научной деятельности, содержащий перечень литературы о его жизни и деятельности, хронологический указатель научных трудов, в том числе монографий и учебных пособий, научных статей, материалов конференций и тезисов докладов, научно-популярных статей, карт и атласов. В книгу включены воспоминания об Александре Кирилловиче академиков Р. Г. Гарецкого и И. И. Лиштвана, членов-корреспондентов Р. Е. Айзберга и М. А. Богдасарова, профессоров Лешека Маркса и В. Н. Губина, к.г.-м.н. Г. И. Илькевича и к.г.н. Д. М. Курловича.



**Прогноз состояния природной среды Беларуси на период до 2035 года / В. М. Байчоров [и др.] ; под общ. ред. В. С. Хомича ; Нац. акад. наук Беларуси [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 332 с.**

В книге представлен комплексный прогноз изменения и состояния природной среды Беларуси на период до 2035 г., включающий прогнозы изменений климата, состояния атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, земельных ресурсов и почв, растительного и животного мира, биологического разнообразия, а также значимых для окружающей среды проблем обращения с отходами и радиационного загрязнения. Рассматриваются методические аспекты прогноза, приводятся ретроспективный анализ, оценка и прогноз факторов, оказывающих влияние на природную среду Беларуси. Анализируются основные угрозы в экологической сфере в прогнозируемый период, обосновываются приоритетные направления действий по их устранению.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Природопользование» просит авторов руководствоваться приведенными ниже правилами.

I. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции соответствующего института либо выписку из протокола заседания ученого совета, отдела или кафедры, а также акт экспертизы).

II. Статья предоставляется в редакцию на белорусском или русском языках; шрифт – Arial, кегль – 10 (в том числе в формулах); межстрочный интервал – одинарный. Занумерованные формулы выключаются в отдельную строку. В тексте не допускаются рукописные вставки и в克莱йки. Статья должна быть подписана всеми авторами.

III. Статья должна иметь следующую структуру:

1. Индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК);

инициалы и фамилии авторов;

название статьи;

полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием города и страны, адрес электронной почты каждого автора.

2. Аннотация (авторское резюме) объемом 150–250 слов должна кратко представлять результаты работы и быть понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи; должна быть информативной, хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации – краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы).

3. Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования; рекомендуемое количество ключевых слов 5–10.

4. Затем метатекстовые данные (все то, что предшествует основному тексту статьи) приводятся на английском языке, причем аннотация должна быть оригинальной (т. е. не являться дословным переводом русскоязычной аннотации). Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводятся на русском (белорусском) языке.

5. Основной текст статьи должен составлять 10–16 с. (т. е. около 40 тыс. знаков); в этот объем также входят таблицы и рисунки, число которых не должно превышать 10. Изложенный материал должен быть четко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). В русско- и белорусскоязычных статьях рекомендуется делать подрисунковые подписи и надписи на самих иллюстрациях на двух языках – русском (белорусском) и английском.

6. Список использованной литературы (не более 40 ссылок) оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.1-2003). Цитированная литература приводится общим списком по мере упоминания, ссылки в тексте даются порядковым номером в квадратных скобках (напр., [1]); ссылки на неопубликованные работы не допускаются).

7. Затем приводится список цитированных источников в романском алфавите («References») со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках], название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык – параграф (для журналов можно не делать)], выходные данные с обозначениями на английском языке.

7. Если присутствует информация о финансировании (поддержке грантами проектов и т. п.), ее следует

давать на русском (белорусском) и английском языках под заголовками «Благодарности» («Падзяка»), «Acknowledgements».

IV. Для подготовки метаданных (так называемый информационный лист) на отдельной странице следует указать на русском и английском языках для каждого автора: фамилию, имя и отчество (полностью), звание, должность, место работы с указанием адреса, контактную информацию (e-mail, телефоны).

V. Электронный вариант статьи предоставляется на диске, флэшке или присыпается по электронной почте в редакцию журнала – eco@nature-nas.by. Текст должен быть набран в Word под Windows, формулы – в редакторе MathType.

### Правила оформления статьи:

параметры страницы – формат А4;

поля – верхнее и нижнее по 2,5 см, левое и правое по 2 см (**страницы не нумеровать!**);

текст набирается шрифтом Arial, кегль 10;

межстрочный интервал – одинарный;

абзацный отступ – 10 мм.

Собственным редактором формул версий Microsoft Office 2007 и выше пользоваться нельзя, так как в редакционно-издательском процессе он не поддерживается. Вставку символов выполнять через меню «Вставка\Символ». Выключку вверх и вниз (C<sup>2</sup>, C<sub>4</sub>) выполнять через меню «Формат\Шрифт\Верхний индекс», «Формат\Шрифт\Нижний индекс». Латинские буквы необходимо набирать курсивом, греческие – прямо (для набора греческих символов следует пользоваться гарнитурой Symbol). Обозначения математических функций (lim, sup, ln, sin, Re, Im и т. п.), символы химических элементов (N, C1) также набираются прямым шрифтом.

VI. Черно-белые и цветные рисунки вставляются в текст статьи (Word) после первого упоминания о них, а также даются в виде отдельных файлов в графическом формате (600 точек на дюйм). Фотографии, помещаемые в статье, должны иметь контрастное черно-белое или цветное изображение. Желательно предоставлять иллюстрации в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирается основной гарнитурой, причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 9 пунктов). На обороте рисунков (если они даются отдельно) указываются фамилии авторов, название статьи. Фотографии предоставляются в виде файлов (tif, jpg, png, eps) и в распечатанном виде. **Таблицы** должны иметь названия на русском и английском языках и располагаться непосредственно по тексту. Не рекомендуется выполнять горизонтальные таблицы. Следует **различать дефис «-» и тире «–»**. В тексте тире отделяется единичными пробелами, между цифрами и числами ставится без пробелов.

VII. Поступившая в редакцию статья направляется на рецензию, затем визируется членом редколлегии. Основным критерием целесообразности публикации является новизна и информативность статьи. Если по рекомендации рецензента статья возвращается автору на доработку, то переработанная рукопись вновь рассматривается редколлегией. Статьи не по профилю журнала возвращаются авторам после заключения редколлегии.

Материалы для публикации следует направлять по адресу: ул. Ф. Скорины, 10, комн. 202, редакция журнала «Природопользование», 220076, г. Минск, Республика Беларусь, либо по электронной почте: eco@nature-nas.by. Тел. для справок: +375 17 325 84 55.

**Научное издание**  
*Scientific publication*

**ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ**  
*NATURE MANAGEMENT*

**№ 2, 2022**

**К 90-летию Института природопользования  
НАН Беларусь**  
*To the 90th anniversary of the Institute of Nature Management  
of the National Academy of Sciences of Belarus*

---

**Редактор** Н. Т. Гавриленко  
*Editor* N. T. Gavrilenko

**Компьютерная верстка** Т. Н. Козловская  
*Computer page making* T. N. Kozlovskaya

**Переводчик** М. Ю. Кравченко  
*Translator* M. Y. Kravchenko

---

Подписано в печать 12.12.2022.  
Формат 60×90/8. Бумага офсетная.  
Гарнитура Ариал. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 27,54.  
Уч.-изд. л. 25,5.  
Тираж 100 экз.  
Заказ № 244.

Signed into print 12.12.2022.  
60×90/8 format. Office paper.  
Arial garniture. Digital print.  
Conditional printed sheets 27.54.  
Conditional edited sheets 25,5.  
Circulation 100 copies.  
Order No.244.

Полиграфическое исполнение  
Республиканское унитарное предприятие  
«Издательский дом «Белорусская наука».  
Свидетельство о государственной  
регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя  
печатных изданий  
№ 1/18 от 02.08.2013,  
№ 2/196 от 05.04.2017.  
Ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск

*Polygraph execution*  
*Republican unitary enterprise*  
*«Publishing house «Belarusian Science».*  
*The Certificate of state registration*  
*of the publisher, manufacturer,*  
*distributor of*  
*printed publications.*  
*№ 1/18 om 02.08.2013,*  
*№ 2/196 om 05.04.2017.*  
*F. Skoriny Str., 40, 220084, Minsk*