

ISSN 2079-3928

Природо- пользование



1

2022

Государственное научное учреждение
«Институт природопользования
Национальной академии наук Беларуси»

Природопользование

2022. № 1

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

Главный редактор

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

Редакционная коллегия

Хомич В. С. – доктор географических наук (*заместитель главного редактора*)
Томсон А. Э. – кандидат химических наук (*заместитель главного редактора*)
Высоченко А. В. – кандидат технических наук (*ответственный секретарь*)
Айзберг Р. Е. – член-корреспондент, доктор геолого-минералогических наук, профессор
Бровка Г. П. – доктор технических наук
Грибик Я. Г. – кандидат геолого-минералогических наук
Жогло В. Г. – доктор геолого-минералогических наук
Какарека С. В. – доктор технических наук, профессор
Камышенко Г. А. – кандидат технических наук
Курзо Б. В. – доктор технических наук
Кухарчик Т. И. – доктор географических наук
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

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
<http://nature-nas.by/journal>



© Институт природопользования
НАН Беларуси, 2022

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

Nature Management

2022. № 1

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

Editor-in-Chief

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

Editorial Board

Valery Khomich – D. Sc. (Geography) (*Associate Editor-in-Chief*)
Aleksey Tomson – Ph. D. (Chemistry) (*Associate Editor-in-Chief*)
Anna Vysochenko – Ph. D. (Technical) (*Executive Secretary*)
Roman Aizberg – Corresponding Member, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor
Gennadiy Brovka – D. Sc. (Technical)
Yaroslav Gribik – Ph. D. (Geology and Mineralogy)
Sergey Kakareka – D. Sc. (Technical), Professor
Halina Kamyshenka – Ph. D. (Technical)
Boris Kurzo – D. Sc. (Technical)
Tamara Kukharchyk – D. Sc. (Geography)
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)
Vasiliy Zhoglo – D. Sc. (Geology and Mineralogy)

International Editorial Council

Valentinas Baltrunas – D. Sc. (Geology), Professor (Lithuania)
Mikhail Cherepanskii – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor (Russia)
Leshek Marks – Dr. Habil. (Geology), Professor (Poland)
Maris Klavins – Dr. Habil. (Chemistry), Professor (Latvia)
Leonid Rudenko – Academician, D. Sc. (Geography) (Ukraine)
Arcadiy Tishkov – Corresponding Member, D. Sc. (Geography) (Russia)
Boris Zuzin – D. Sc. (Technical), 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
<http://nature-nas.by/journal>



СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

Логинов В. Ф., Хитриков М. А., Зайко П. О., Савич-Шемят О. Г. <i>Loginov V. F., Khirtrykau M. A., Zaiko P. O., Savich-Shemet O. G.</i>	Особенности изменения комфортности климата Беларуси для человека по месяцам и сезонам года <i>Particular features in changes of climate comfort for human in Belarus for months and seasons of the year</i>	5
Козыренко М. И., Кухарчик Т. И. <i>Kazyrenka M. I., Kukharchyk T. I.</i>	Подходы к оценке рисков в связи с загрязнением почв на урбанизирован- ных территориях (на основе зарубежного опыта) <i>Approaches to risk assessment associated with soil contamination in urban areas (based on foreign experience)</i>	22
Коляда В. В. <i>Kalyada V. V.</i>	Влияние климатических трендов на динамику урожайности зерновых культур в Минской и Могилевской областях <i>Influence of climate trends on dynamics yield of grain crops in Minsk and Mogilev regions</i>	36
Михальчук Н. В., Качанович П. В., Ажгиревич А. Н., Дашкевич М. М. <i>Mikhalchuk M. V., Kachanovich P. V., Ashgirevich A. N., Dashkevich M. M.</i>	Особенности вертикальной миграции тяжёлых металлов в почвах различных типов лесных биогеоценозов при аэротехногенном загрязнении свинецсо- держащей пылью <i>Features of vertical migration of heavy metals in soils of various types of forest biogeocenosis during aerotechnogenic contamination with lead-containing dust</i>	45
Романкевич Ю. А. <i>Ramankevich J. A.</i>	Распределение тяжелых металлов в почвах на территории малого города (на примере г. Несвижа) <i>Distribution of heavy metals in soils on the territory of the small town (on the ex- ample of Nesvizh)</i>	56
Кравчук Л. А., Яновский А. А., Баженова Н. М. <i>Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M.</i>	Дистанционная оценка влияния растительного покрова на температуру под- стилающей поверхности основных геотехнических систем крупного города (на примере Минска) <i>Remote evaluation of the influence of vegetation cover on the land surface tem- perature in main geotechnical systems of the large city (by the example of Minsk)</i>	71

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

Матвеев А. В. <i>Matveyev A. V.</i>	История формирования рельефа южной части Беларуси в четвертичное время <i>Relief forming history of south Belarus area during quaternary period</i>	83
Лиштван И. И., Навоша Ю. Ю., Тановицкая Н. И., Ратникова О. Н. <i>Lishtvan I. I., Navosha Yu. Yu., Tanovitskaya N. I., Ratnikova O. N.</i>	Оценка современного состояния торфяных месторождений Брестской, Гомельской и Могилевской областей Беларуси с использованием спутнико- вых снимков <i>Assessment of the current state of peat deposits of Brest, Gomel and Mogilev regions of Belarus using satellite images</i>	91
Шпак С. Е. <i>Shpak S. Ya.</i>	Физические свойства пород кембрийских отложений Прибугской структуры Подляско-Брестской впадины <i>The physical properties of the Cambrian rocks of the Bug structure of the Podlassko-Brest depression</i>	103

Майоров В. В., Аусев В. Г., Парфенов К. В., Луговский Н. Н., Красновский С. В., Машезов А. А., Лукашевич А. А. <i>Mayorov V. V., Ausev V. G., Parfenov K. V., Lugovski N. N., Krasnovski S. V., Mashezau A. A., Lukashevich A. A.</i>	Обоснование обустройства и эксплуатации Мозырского подземного храни- лища газа <i>Substantiation of the arrangement and operation of the Mozyr underground gas storage facility</i>	112
--	---	-----

ГЕОТЕХНОЛОГИИ. ДОБЫЧА, ПЕРЕРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ *GEOTECHNOLOGY. EXTRACTION, PROCESSING AND THE USE OF SOLID FUEL MINERALS*

Лиштван И. И., Дударчик В. М., Крайко В. М., Ануфриева Е. В. <i>Lishtvan I. I., Dudarchik V. M., Kraiko V. M., Anufrieva E. V.</i>	Утилизация полимерных отходов пиролизом в композициях с торфом <i>Utilization of polymer waste by pyrolysis in compositions with peat</i>	118
Наумова Г. В., Жмакова Н. А., Макарова Н. Л., Овчинникова Т. Ф., Макеев А. А., Навоша Ю. Ю., Калилец Л. П. <i>Naumova G. V., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F., Makeenko A. A., Navosha Yu. Yu., Kalilets L. P.</i>	Подбор и характеристика торфяного и растительного сырья для получения биоцидных препаратов <i>Selection and characterization of peat and plant materials for biocidal preparations</i>	125
Курзо Б. В., Кляуззе И. В., Ворона М. В., Серая С. М., Гайдукевич О. М. <i>Kurzo B. V., Klyauzze I. V., Vorona M. V., Seraya S. M., Gaidukevich O. M.</i>	Использование торфа и сапропеля для получения гуминового регулятора роста растений <i>Use of peat and sapropel for obtaining humic plant growth regulator</i>	136
Кунцевич В. Б., Макаренко Т. И., Курзо Б. В., Агейчик И. В., Калилец Л. П. <i>Kuntsevich V. B., Makarenko T. I., Kurzo B. V., Ageichik I. V., Kalilets L. P.</i>	Обоснование выбора месторождений органического сапропеля для разра- ботки с целью получения товарной продукции <i>Rationale for choosing of organic sapropel deposits for the development in order to obtain marketable products</i>	146
Томсон А. Э., Соколова Т. В., Гончарова И. А., Арашкова А. А., Сосновская Н. Е., Пехтерева В. С. <i>Tomson A. E., Sokolova T. V., Gontcharova I. A., Arashkova A. A., Sosnovskaya N. E., Pekhtereva V. S.</i>	Связывание ионов тяжелых металлов мицелием грибов рода <i>Aspergillus</i> , колонирующих картон <i>Binding of heavy metal ions by aspergillus mycelium colonizing cardboard</i>	157
Томсон А. Э., Марзан А. С., Царюк Т. Я., Фалюшина И. П., Соколова Т. В., Калантаров М. Г., Пехтерева В. С. <i>Tomson A. E., Marzan A. S., Tsariuk T. Y., Faliushyna I. P., Sokolova T. V., Kalantarov M. G., Pehtereve V. S.</i>	Влияние модифицирующих добавок на качественные показатели торфяных активированных углей <i>Influence of organic modifying additives on qualitative indicators of peat activated coal</i>	166

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ
GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-5-21>
УДК 551.586

Поступила в редакцию 04.04.2022
Received 04.04.2022

**ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КОМФОРТНОСТИ КЛИМАТА БЕЛАРУСИ
ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА ПО МЕСЯЦАМ И СЕЗОНАМ ГОДА**

В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков, П. О. Зайко, О. Г. Савич-Шемет

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье проведено исследование комфортности климата в Беларуси на основе анализа пространственно-временных изменений биоклиматических индексов: эффективной температуры, эквивалентно-эффективной температуры и биоклиматического индекса теплосодержания воздуха за период 1966–2020 гг. Показано, что повышение средних температур, снижение средней скорости ветра и незначительные изменения влажности воздуха привели к улучшению комфортности погодно-климатических условий и снижению повторяемости дней с очень холодной погодой. В переходные сезоны повышение комфортности климата обычно было менее заметным, чем зимой и летом. В целом, с конца 1970-х годов наиболее значительный прирост значений индексов комфортности климата наблюдался в периоды июль–август и ноябрь–декабрь; существенный прирост значений эффективной температуры и эквивалентно-эффективной температуры отмечался также в период февраль–апрель. Подобный характер изменений хорошо согласуется с особенностями изменений климата для отдельных фаз периода потепления, характеризовавшимися более выраженным повышением средних температур в отдельные сезоны года. Таким образом, в силу пространственно-временной неоднородности потепления климата неоднородным является и характер изменений биоклиматических индексов комфортности, однако можно утверждать, что индексы комфортности устойчиво повышаются, начиная с 80-х годов прошлого столетия.

Ключевые слова: биоклиматические индексы комфортности; современные изменения климата; температура; влажность воздуха; скорость ветра.

Для цитирования. Логинов В. Ф., Хитриков М. А., Зайко П. О., Савич-Шемет О. Г. Особенности изменения комфортности климата Беларуси для человека по месяцам и сезонам года // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 5–21.

**PARTICULAR FEATURES IN CHANGES OF CLIMATE COMFORT
FOR HUMAN IN BELARUS FOR MONTHS AND SEASONS OF THE YEAR**

V. F. Loginov, M. A. Khitrykau, P. O. Zaiko, O. G. Savich-Shemet

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

Abstract. In this article the study of comfort level of climate has been performed on the basis of analysis of spatio-temporal changes of bioclimatic indexes: effective temperature, equivalent-effective temperature and bioclimatic air heat content index for the period from 1966 to 2020. The increase in average temperatures, the decrease in wind speed and insignificant changes in air humidity led to the improvement in the comfort level of climate and weather and decrease in frequency of days with very cold weather. Usually, the increase in climate comfort level was less evident in mid-seasons than in winter and summer. In total, since late 1970s the most significant increase in values of climate comfort indices was observed in July–August and November–December; significant increase in values of effective temperature and equivalent-effective temperatures was also observed in February–April. This pattern of changes corresponds to climate changes during distinct phases of warming period, characterized by more significant increase in the average temperature in certain seasons. Thus, due to the spatiotemporal heterogeneity of climate warming, the nature of changes, bioclimatic comfort indices is also heterogeneous. Nevertheless, it is possible to state that values of comfort indexes steadily increase since 1980s.

Keywords: bioclimatic indexes of comfort; modern climate change; temperature; air humidity; wind speed.

For citation. Loginov V. F., Khitrykau M. A., Zaiko P. O., Savich-Shemet O. G. Particular features in changes of climate comfort for human in Belarus for months and seasons of the year. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 5–21.

Введение. Современное потепление климата оказывает влияние не только на условия ведения хозяйственной деятельности, но и на самочувствие человека. Характер и величина изменений метеоэлементов влияют на заболеваемость и смертность через патологии дыхательной и сердечно-сосудистой систем, определяют возможность и допустимое время нахождения человека на открытом воздухе, а также могут воздействовать на психическое состояние человека.

В медицинской климатологии для характеристики комфортности климата главным образом используются температура, влажность воздуха, скорость ветра, атмосферные осадки, атмосферное давление, а также целый ряд индексов, полученных на основе указанных метеоэлементов. В странах СНГ наиболее распространенными индексами являются эффективная температура (TE) и эквивалентно-эффективная температура ($ЭЭТ$), которые рассматриваются в данной работе. Согласно [1], индексы классифицируются в зависимости от того, какие параметры используются для их расчета: TE является температурно-влажностным индексом, а $ЭЭТ$ – температурно-влажностно-ветровым. Данные индексы служат для характеристики теплоощущений человека, находящегося на открытом воздухе. Однако этого недостаточно для полного описания степени комфортности климата, поэтому в настоящей работе также рассматривался биоклиматический индекс теплосодержания воздуха ($БИТ$), или энтальпия (i). Суть заключается в том, что значения индекса прямо пропорциональны повторяемости экстремально низких температур, и он характеризует потери тепла поверхностью тела человека. $БИТ$ относится к категории температурно-влажностных индексов. Указанные три индекса будут достаточно полно описывать изменения степени комфортности климата Беларуси за последние десятилетия.

Методы и данные. Данная работа является продолжением статьи [2], поскольку имеет единую с ней методологию. Эффективная температура (TE) рассчитывалась по формуле

$$TE = t - 0,4(t - 10)(1 - f / 100), \quad (1)$$

где t – температура воздуха, °C; f – относительная влажность, %. Градации значений TE по степени комфортности даны в [1, 2]. Для расчета значений $ЭЭТ$ использовалась формула А. Миссенарда [1, 3]:

$$ЭЭТ = 37 - (37 - t) / (0,68 - 0,0014f + 1 / (1,76 + 1,4v^{0,75})) - 0,29t(1 - f / 100). \quad (2)$$

Здесь v – скорость ветра в м/с, а остальные параметры аналогичны расчетной формуле TE . Градации $ЭЭТ$ по степени комфортности различаются в зависимости от региона; применяемая для территории Беларуси классификация дана в [4]. $БИТ$, или энтальпия (i), рассчитывается по формуле

$$i = cpT + 0,622(e / (1006,6 - e))(L + cpwT), \quad (3)$$

где значения индекса выражаются в ккал/кг. Здесь T – абсолютная температура, °K, e – парциальное давление водяного пара в гПа, cp и cpw – удельные значения теплоемкости при постоянном давлении для сухого воздуха и пара соответственно, кал/г·°C, L – скрытая теплота парообразования при 0 °C, кал/г. Градации значений энтальпии приведены в [2, 4].

Источником данных служили электронные архивы системы CliWare [5], доступ к которым был предоставлен в ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (Белгидромет) [6]. Для расчета использовались среднесуточные значения метеоэлементов для всех станций Беларуси, для которых были доступны непрерывные ряды наблюдений достаточной продолжительности.

Расчет значений индексов осуществлялся за период с 1966 по 2020 г., т. е. для всего периода, для которого были доступны данные нужного разрешения. Данный отрезок времени был разбит на три подпериода: 1966–1976 гг. (I), 1977–1998 гг. (II), 1999–2020 гг. (III). Суть подобного деления доступного ряда наблюдений описана в [2, 7]. Для построения карт использовался программный комплекс QGIS [10]; интерполяция значений индексов осуществлялась с помощью метода обратного взвешенных расстояний.

Результаты и их обсуждение. Средние значения эффективной температуры (TE), биоклиматического индекса теплосодержания воздуха (энтальпии) и $ЭЭТ$ по Миссенарду по календарным сезонам года представлены на рис. 1–6. В целом общие особенности пространственно-временных изменений биоклиматических индексов комфортности климата главным образом определяются изменениями температуры воздуха, а локальные особенности – преимущественно изменениями характеристик влажности и скорости ветра. Главная особенность временных изменений заключается в том, что наиболее интенсивный прирост значений индексов отмечается в 1999–2020 гг., так как именно в этот период

происходит наиболее заметное повышение средней температуры всех сезонов. Прирост значений индексов за период 1977–1998 гг. относительно средних за 1966–1976 гг. незначителен или отсутствует, поскольку на протяжении большей части года значения температуры и относительной влажности не претерпевали существенных изменений. Значения средней скорости ветра устойчиво снижались на протяжении всего рассматриваемого периода. Темпы этого снижения были относительно равномерны, однако его характер изменялся в зависимости от сезона года: в холодный период года средняя скорость ветра снижалась быстрее, особенно осенью и, с началом периода активного потепления климата (~1988 г.), зимой. Летом снижение скорости ветра было наименьшим, однако следует учитывать, что для территории Беларуси наименьшие средние скорости ветра свойственны именно этому сезону.

Главная особенность пространственных изменений заключается в том, что градиент значений индексов комфортности совпадает с градиентом температуры воздуха и направлен с северо-востока на юго-запад зимой и с севера на юг летом; эта особенность изменений градиента индексов сохраняется на протяжении всего рассматриваемого периода. Исключением является только градиент значений энтальпии в летний период 1999–2020 гг., когда он приобретает направление с северо-запада на юго-восток, что связано с усилением континентальности климата и интенсивности испарения [8, 9, 11].

Рассмотрим изменения эффективной температуры (TE) по сезонам года. В зимний период (рис. 1) градиент значений TE четко прослеживается на протяжении всего рассматриваемого периода, а выраженных локальных экстремумов не наблюдается. Исключением является только станция Пружаны, на которой в 1999–2020 гг. формируется локальный минимум значений индекса из-за пропусков в рядах исходных данных. Подобный характер пространственного распределения во многом повторяет распределение средней температуры воздуха. Роль влажности воздуха ослабевает, так как общее количество водяного пара (абсолютная влажность) зимой на территории Беларуси снижается, а значения относительной влажности остаются устойчиво высокими. На протяжении всего рассматриваемого периода минимальные значения TE свойственны станции Горки ($-6,1$ °C за 1966–1976 гг., к 1999–2020 гг. повысилось до $-3,9$ °C), а наибольшие – станции Брест ($-2,2$ °C и $-0,6$ °C за указанные периоды). Среднее значение индекса за рассматриваемый период выросло от $-4,5$ °C до $-2,5$ °C, и темпы его прироста были относительно равномерны.

Направление градиента значений TE в весенний период (см. рис. 1) становится подобным направлению градиента температуры за лето, и эта особенность достаточно четко прослеживается на всем протяжении рассматриваемого периода времени. Тем не менее в период с 1977 г. начинают формироваться небольшие локальные экстремумы значений TE , особенно в северной части страны. Их формирование обусловлено в первую очередь разностью средних значений относительной влажности между станциями, а также эффектом городских островов тепла. Наибольшие значения TE свойственны станции Брест ($7,8$ °C за 1966–1976 гг., выросли до $9,1$ °C в период 1999–2020 гг.), однако пространственное расположение минимума значений TE на протяжении рассматриваемого периода менялось: в 1966–1976 гг. он находился в Верхнедвинске ($5,6$ °C), в 1977–1998 гг. – в Лынтупах ($5,7$ °C), а в 1999–2020 гг. – в Езерище ($6,5$ °C). Средние весенние значения индекса за рассматриваемый период выросли с $6,5$ °C до $7,7$ °C. Наиболее интенсивный его прирост наблюдался в 1999–2020 гг., и, таким образом, изменения значений индекса TE связаны с особенностями изменений климата за отдельные фазы [8, 9, 11].

Важнейшими особенностями изменений значений TE в летний период (рис. 2) являются отклонение изотерм от широтного характера, связанное с преобладанием в юго-восточной части Беларуси более низких значений влажности и формированием крупных локальных экстремумов температуры. Низкие значения на станции Новогрудок и, частично, Барановичи, обусловлены влиянием орографии на температуру и влажность. Низкие значения на станции Полесская обусловлены снижением средних температур на осушенных землях. На всем протяжении рассматриваемого периода наибольшие значения TE свойственны станции Гомель ($16,9$ °C за 1966–1976 гг., повысилось до $18,5$ °C в 1999–2020 гг.). В течение периода 1966–1976 гг. наименьшие значения индекса наблюдались на станции Новогрудок ($15,6$ °C), а в остальные подпериоды – на станции Лынтупы (15 °C и $16,2$ °C за 1977–1998 гг. и 1999–2020 гг. соответственно). Средние значения индекса выросли от $16,1$ °C до $17,3$ °C. Темпы прироста значений индекса были наибольшими в 1999–2020 гг., и причины этого аналогичны изменениям темпа прироста в весенний период.

Распределение значений TE в осенний период (рис. 2) характеризуется градиентом, переходным от «летнего» к «зимнему» и незначительными локальными экстремумами, обусловленными главным образом распределением средних значений относительной влажности. Примечательно, что в 1999–2020 гг. распределение значений TE по территории Беларуси приобретает поразительно равномерный характер, что главным образом связано с подобными особенностями изменения температуры воздуха. На всем протяжении рассматриваемого периода наибольшие значения TE свойственны станции Брест

(7,9 °C за 1966–1976 гг., выросли до 9 °C в 1999–2020 гг.). В течение периода 1966–1976 гг. наименьшие значения индекса наблюдались на станции Витебск (5,6 °C), а в остальные подпериоды – на станции Горки (5,2 °C в 1977–1998 гг. и 6,6 °C в 1999–2020 гг.). Средние значения индекса по территории Беларуси выросли от 6,5 °C в 1966–1976 гг. до 7,5 °C в 1999–2020 гг. Важно отметить, что для юго-западной части Беларуси темпы прироста были ниже, чем для остальной Беларуси. В другие сезоны подобные региональные различия были выражены слабо или отсутствовали вообще.

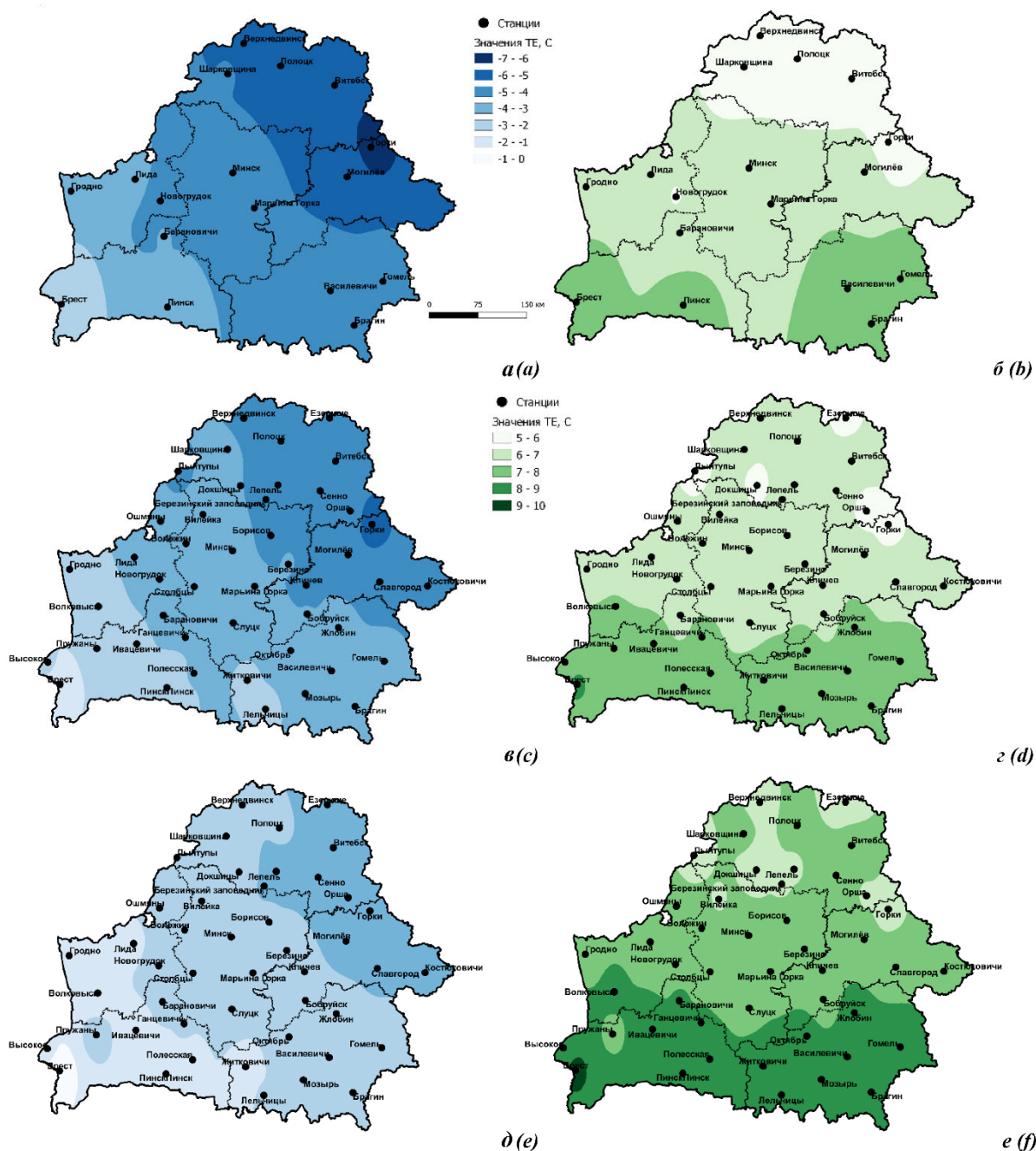


Рис. 1. Средние значения эффективной температуры (TE) за зимний (а, в, д) и весенний (б, г, е) периоды в 1966–1976 гг. (а, б), 1977–1998 гг. (в, г) и 1999–2020 гг. (д, е)

Fig. 1. Average values of effective temperature (TE) in winter (a, c, e) and spring (b, d, f) in 1966–1976 (a, b), 1977–1998 (c, d) and 1999–2020 (e, f)

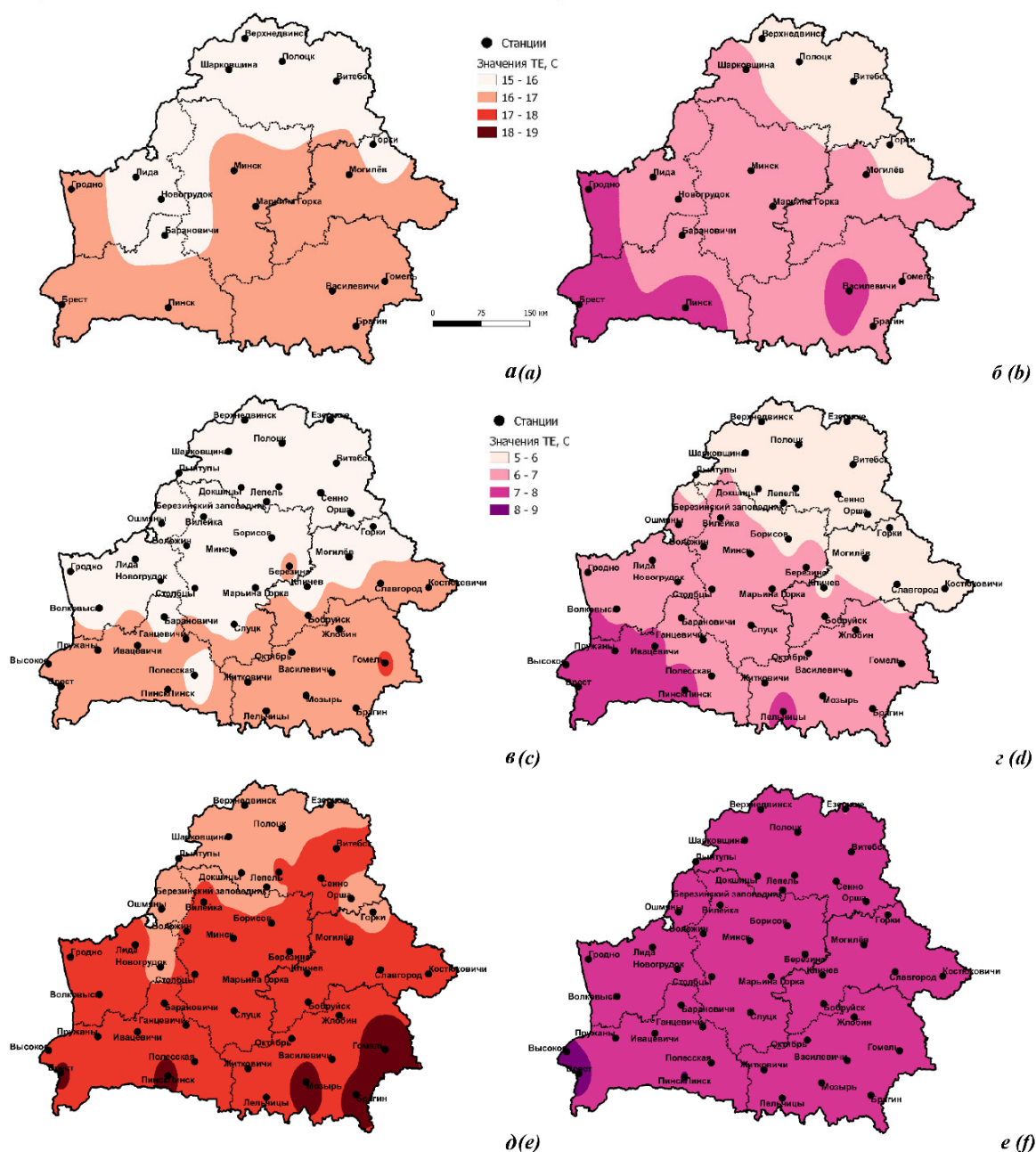


Рис. 2. Средние значения эффективной температуры (TE) за летний (а, в, д) и осенний (б, г, е) периоды в 1966–1976 гг. (а, б), 1977–1998 гг. (в, г) и 1999–2020 гг. (д, е)

Fig. 2. Average values of effective temperature (TE) in summer (a, c, e) and autumn (b, d, f) in 1966–1976 (a, b), 1977–1998 (c, d) and 1999–2020 (e, f)

Изменения биоклиматического индекса теплосодержания воздуха (здесь и далее – энтальпии) имеют достаточно равномерный характер (величина шага шкалы энтальпии невелика и составляет 0,5 ккал/кг). Эта особенность применима для всех сезонов года. Так, зимой градиент значений энтальпии аналогичен градиенту температуры воздуха; значительные аномалии БИТ отсутствуют, а формирование экстремумов в 1999–2020 гг. связано с техническими причинами (прекращением работы ряда станций и пропусками в рядах данных) (рис. 3). Наибольшие значения индекса свойственны станции Брест (67,2 ккал/кг за 1977–1998 гг. и 67,6 ккал/кг за 1999–2020 гг.); в 1977–1998 гг. наименьшие значения индекса отмечались на станции Горки (65,8 ккал/кг), а в 1999–2020 гг. – на станции Езерище (66,4 ккал/кг). Средние значения БИТ за 1977–2020 гг. выросли с 66,4 до 66,8 ккал/кг.

Изменения градиента значений энтальпии весной напоминает «летний» характер, однако общие темпы прироста ее значений понижаются (рис. 3). Данная особенность изменений БИТ свойственна в целом переходным сезонам. Минимальные значения в весенний сезон наблюдаются на станции Езерище (70 ккал/кг за 1977–1998 гг. и 70,2 ккал/кг за 1999–2020 гг.). В 1977–1998 гг. наибольшие значения БИТ отмечаются в Бресте (71 ккал/кг), а в 1999–2020 гг. – в Пинске (71,4 ккал/кг). Средние значения индекса за 1977–2020 гг. выросли с 70,4 до 70,8 ккал/кг.

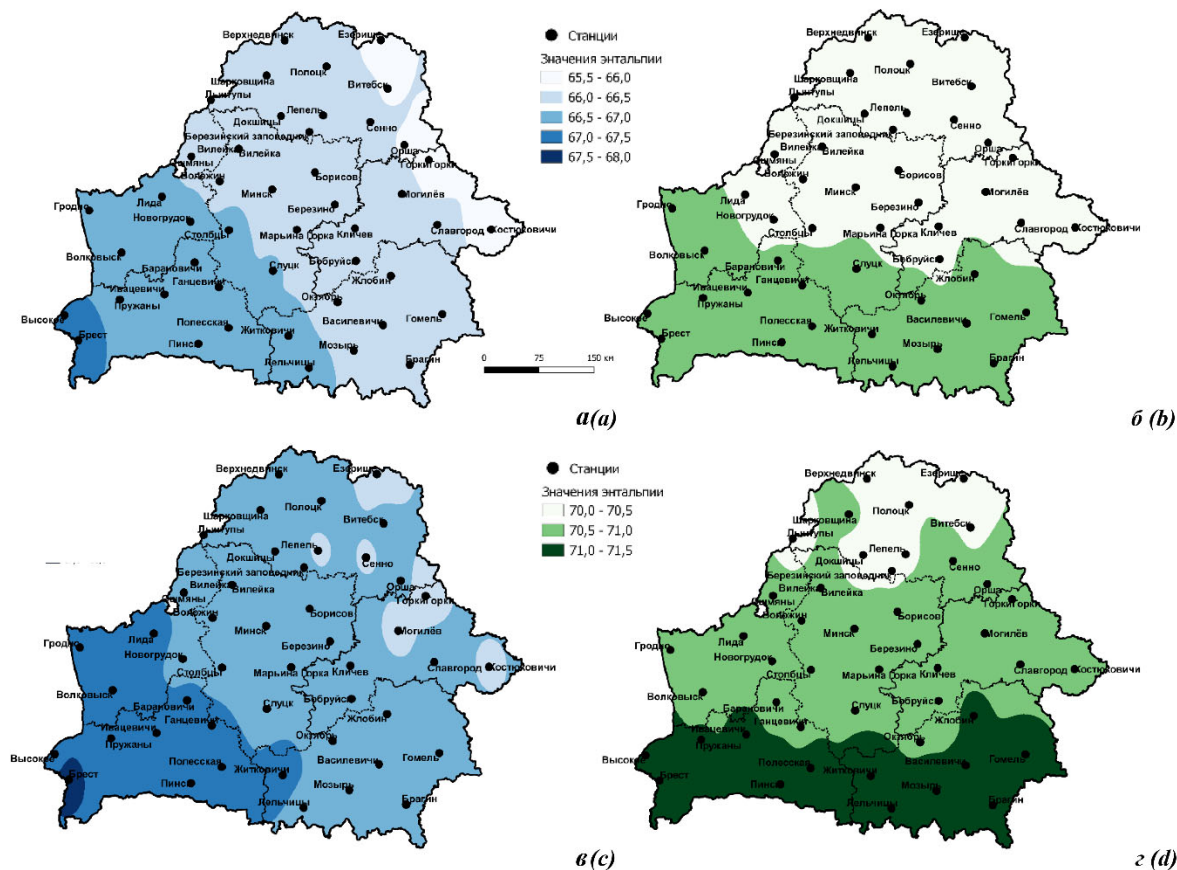


Рис. 3. Средние значения БИТ (энтальпии) за зимний (а, в) и весенний (б, г) периоды в 1977–1998 гг. (а, б) и 1999–2020 гг. (в, г)

Fig. 3. Average values of bioclimatic heat content index in winter (a, c) and spring (b, d) in 1977–1998 (a, b and 1999–2020 (c, d)

Изменения характера распределения значений энтальпии в летний период (рис. 4) примечательны тем, что с начала 2000-х гг. на всей территории Беларуси (за исключением Поозерской физико-географической области) отмечается усиление засушливости климата, особенно выраженное в юго-восточной части страны. Благодаря этому градиент значений энтальпии летом приобретает четкое направление с северо-запада на юго-восток. Кроме того, наибольший прирост значений энтальпии в 1999–2020 гг. характерен именно летнему сезону, что соответствует характеру изменений климата. В целом наиболее низкие значения индекса отмечаются на станции Лынтупы (75,3 ккал/кг в 1977–1998 гг. и 76 ккал/кг в 1999–2020 гг.). Максимальные значения БИТ в 1977–1998 гг. отмечались на станции Гомель (76,3 ккал/кг), а в 1999–2020 гг. – на станции Брагин (77,4 ккал/кг). Средние значения индекса за 1977–2020 гг. выросли с 75,8 до 76,7 ккал/кг.

В 1977–1998 гг. изменения градиента значений энтальпии осенью были практически аналогичны изменениям градиенту температуры воздуха зимой, однако в 1999–2020 гг. из-за изменения сезонного характера потепления климата он приобрел промежуточный характер (рис. 4). Общие темпы прироста значений индекса относительно невелики и сопоставимы с весенними. Наибольшие значения энтальпии в этот сезон свойственны станции Брест (71,5 ккал/кг за 1977–1998 гг. и 72 ккал/кг за 1999–2020 гг.). Наименьшие значения БИТ в 1977–1998 гг. отмечались на станции Езерище (70,4 ккал/кг), а в 1999–2020 гг. – на станции Могилёв (71 ккал/кг). Средние значения индекса за 1977–2020 гг. выросли с 70,8 до 71,4 ккал/кг.

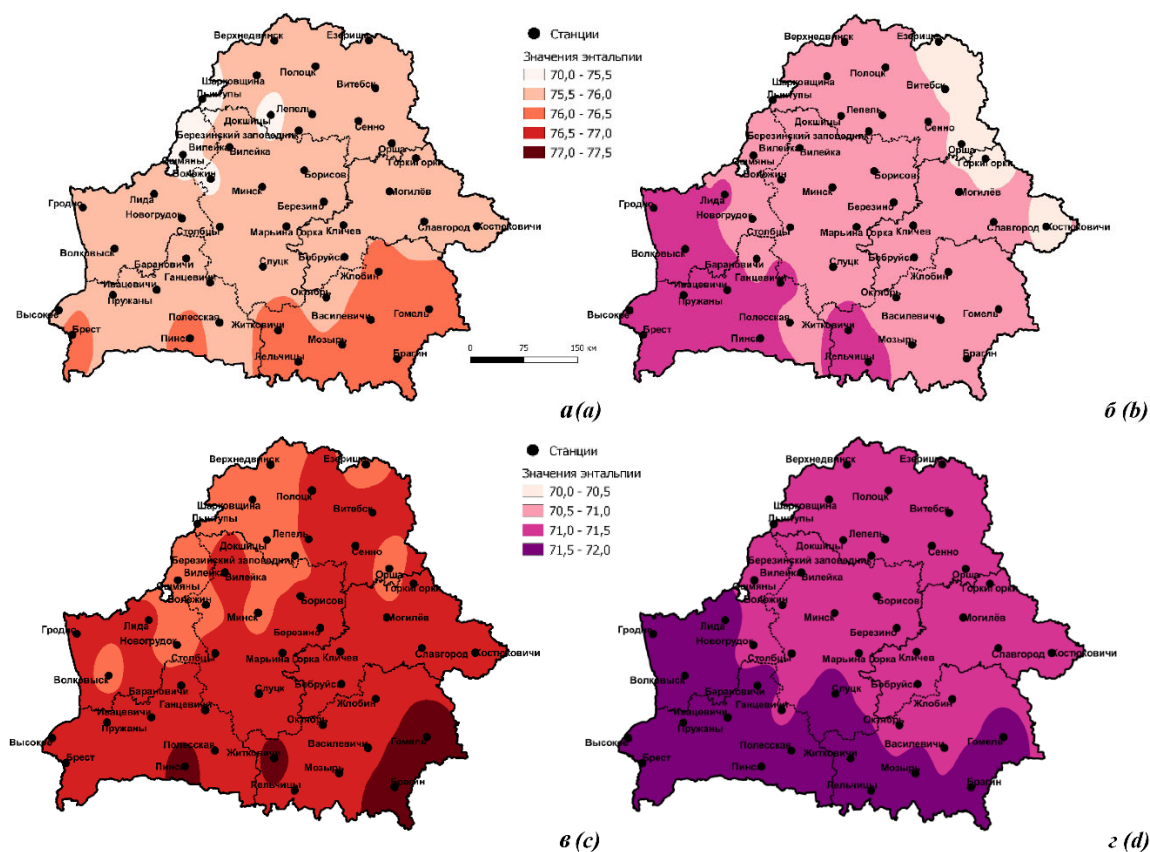


Рис. 4. Средние значения БИТ (энтальпии) за летний (а, в) и осенний (б, г) периоды в 1977–1998 гг. (а, б) и 1999–2020 гг. (в, г)

Fig. 4. Average values of bioclimatic heat content index in summer (a, c) and autumn (b, d) in 1977–1998 (a, b) and 1999–2020 (c, d)

Для территории Беларуси среднегодовые значения ЭЭТ являются отрицательными; положительными они становятся только летом. Даже в настоящее время в весенний и осенний период (рис. 5, б) средние для территории страны значения ЭЭТ являются отрицательными, а положительные значения свойственны лишь отдельным станциям. Главной характерной особенностью распределения значений ЭЭТ является наличие большого числа локальных экстремумов, из-за чего определить градиент ЭЭТ трудно во все сезоны года. Это главным образом обусловлено пространственно-временными изменениями средней скорости ветра, которая сильно зависит от шероховатости подстилающей поверхности. Другой важной особенностью является то, что характер сезонных изменений температуры воздуха сказывается на временных изменениях значений ЭЭТ. Эта особенность прослеживается и в изменениях значений TE .

В целом зимой значения ЭЭТ повышаются при продвижении с северо-востока на юго-запад, однако эта особенность нарушается на многих станциях из-за разности в значениях средней скорости ветра и темпах ее изменений (см. рис. 5). В настоящий период (1999–2020 гг.) число и размер локальных экстремумов ЭЭТ растет. Наиболее выразительными из них являются максимум значений ЭЭТ в западной части Минской области. Он прослеживается во все сезоны кроме лета, и его формирование обусловлено более существенным снижением скорости ветра в результате действия микроклиматических факторов. Минимумы значений ЭЭТ на станциях Новогрудок, Ошмяны и Полесская обусловлены естественными факторами: орографией и мелиорированностью территории. Минимум значений ЭЭТ на станции Пружаны связан с пропусками в исходных рядах данных, а минимум ЭЭТ на станции Докшицы – с более низкими темпами снижения средней скорости ветра по сравнению с другими станциями. Минимум значений ЭЭТ на станции Могилёв объясняется тем, что пункт наблюдений вынесен на территорию аэропорта и не подвержен эффекту городского острова тепла. Также важно отметить, что в зимний период территории Беларуси свойственна наибольшая контрастность значений ЭЭТ. Наименьшие значения ЭЭТ свойственны станции Горки ($-23,1^{\circ}\text{C}$ за 1966–1976 гг., повысилось до -19°C в 1999–2020 гг.), а наибольшие – станциям Брест (-15°C за 1966–1976 гг. и $-13,8^{\circ}\text{C}$ за 1977–1998 гг.) и Вилейка (в 1999–2020 гг., $-11,2^{\circ}\text{C}$). Средние значения ЭЭТ за сезон выросли с $-19,5^{\circ}\text{C}$ в 1966–1976 гг. до $-14,4^{\circ}\text{C}$ в 1999–2020 гг.

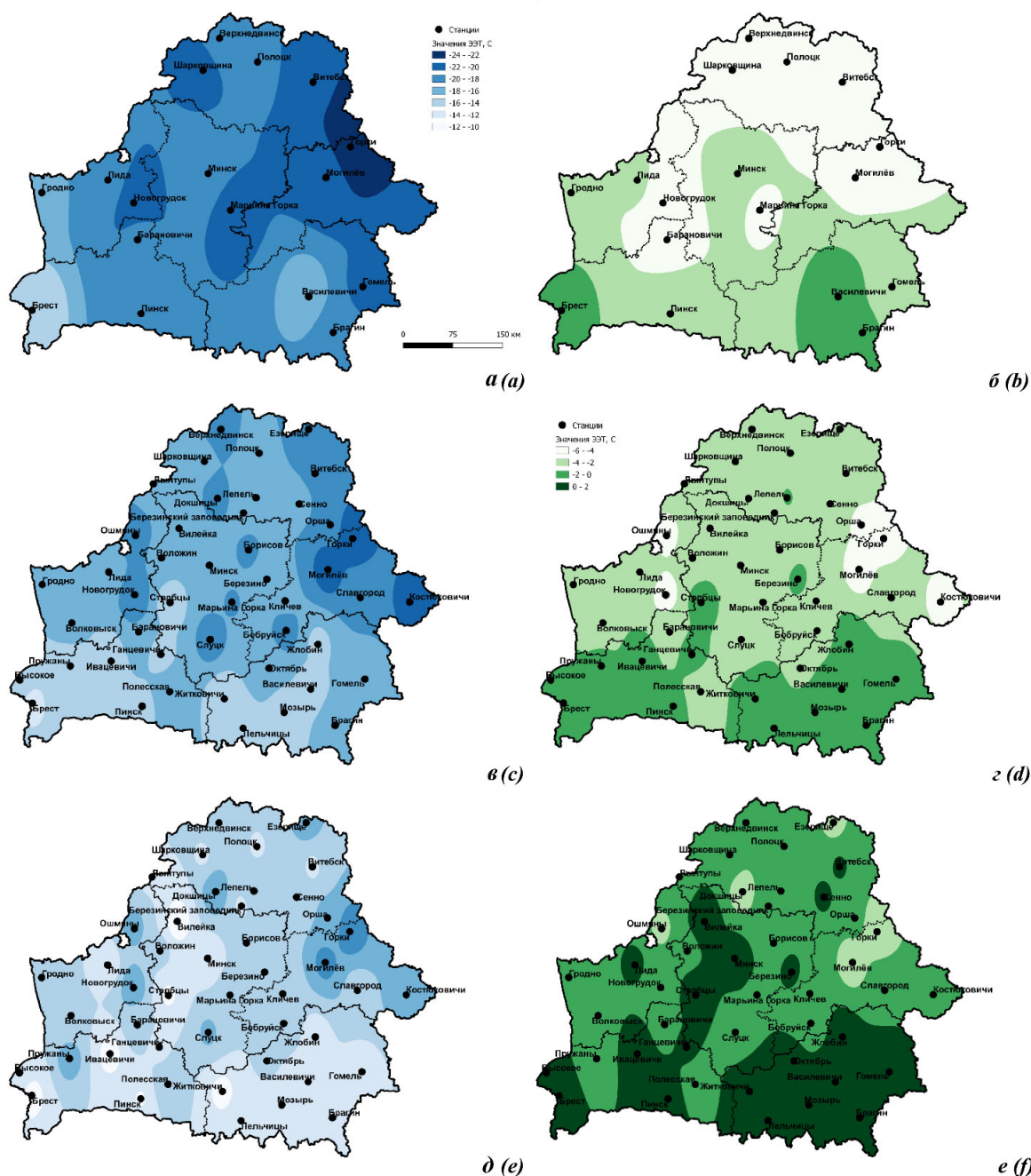


Рис. 5. Средние значения эквивалентно-эффективной температуры (ЭЭТ) по А. Миссенарду за зимний (а, в, д) и весенний (б, г, е) периоды в 1966–1976 гг. (а, б), 1977–1998 гг. (в, г) и 1999–2020 гг. (д, е)

Fig. 5. Average values of equivalent-effective temperature (EET) by A. Misenard in winter (a, c, e) and spring (b, d, f) in 1966–1976 (a, b), 1977–1998 (c, d) and 1999–2020 (e, f)

Весной градиент значений ЭЭТ приобретает квазиширотный характер, нарушаемый локальными минимумами и максимумами, указанными ранее (см. рис. 5). В 1999–2020 гг. на станциях Лида и Витебск отмечаются локальные максимумы значений ЭЭТ, обусловленные эффектом городского острова тепла. Прирост значений ЭЭТ за 1977–1998 гг. относительно периода 1966–1976 гг. очень мал, что связано с изменением характера потепления климата [7–9]. Эта же особенность изменений ЭЭТ свойственна и летнему сезону. Наименьшие значения ЭЭТ свойственны станции Горки ($-5,3^{\circ}\text{C}$ в 1966–1976 гг., выросли до $-3,2^{\circ}\text{C}$ в 1999–2020 гг.), а наибольшие – станциям Василевичи ($-1,2^{\circ}\text{C}$ в 1966–1976 гг. и $-0,4^{\circ}\text{C}$ в 1977–1998 гг.) и Мозырь (2°C в 1999–2020 гг.). Средние значения ЭЭТ за сезон выросли с $-3,7^{\circ}\text{C}$ в 1966–1976 гг. до $-0,3^{\circ}\text{C}$ в 1999–2020 гг.

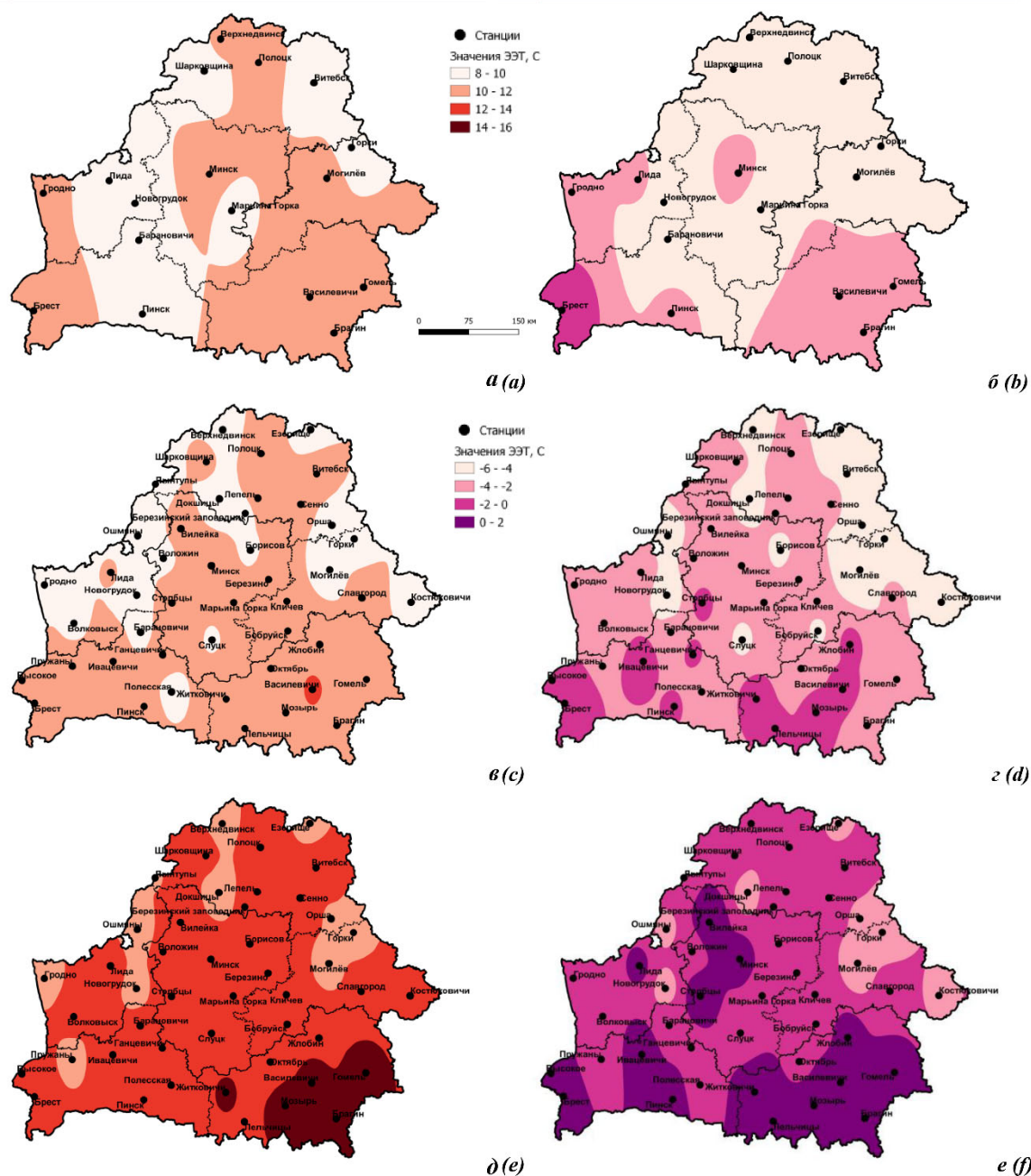


Рис. 6. Средние значения эквивалентно-эффективной температуры (ЭЭТ) по А. Миссенарду за летний (а, в, д) и осенний (б, г, е) периоды в 1966–1976 гг. (а, б), 1977–1998 гг. (в, г) и 1999–2020 гг. (д, е)

Fig. 6. Average values of equivalent-effective temperature (EET) by A. Missenard in summer (a, c, e) and autumn (b, d, f) in 1966–1976 (a, b), 1977–1998 (c, d) and 1999–2020 (e, f)

Поскольку летом средняя скорость ветра наименьшая по сравнению с другими сезонами, градиент значений ЭЭТ в этот сезон прослеживается четче (особенно в период современного потепления климата) из-за возрастающей роли изменений влажности. В этой связи изолинии отклоняются от квазиширотного направления и приобретают характер, схожий с распределением энтальпии (см. рис. 6). Наименьшие значения ЭЭТ свойственны станциям Новогрудок ($9,3^{\circ}\text{C}$ в 1966–1976 гг.) и Ошмяны ($8,6^{\circ}\text{C}$ в 1977–1998 гг. и $10,8^{\circ}\text{C}$ в 1999–2020 гг.), а наибольшие – станциям Василевичи ($11,9^{\circ}\text{C}$ в 1966–1976 гг. и $12,1^{\circ}\text{C}$ в 1977–1998 гг.) и Гомель ($14,7^{\circ}\text{C}$ в 1999–2020 гг.). Средние значения ЭЭТ за сезон выросли с $10,6^{\circ}\text{C}$ в 1966–1976 гг. до $12,8^{\circ}\text{C}$ в 1999–2020 гг.

Характер пространственного распределения значений ЭЭТ в осенний период во многом совпадает с весенним сезоном, однако изменения градиента ЭЭТ в этот сезон имеют «летний» характер (чем отличаются от БИТ и TE , для которых градиент значений в осенний период ближе к «зимнему»).

Наибольшие значения индекса свойственны станциям Брест ($-1,2^{\circ}\text{C}$ в 1966–1976 гг. и $-0,7^{\circ}\text{C}$ 1977–1998 гг.) и Вилейка ($1,8^{\circ}\text{C}$ в 1999–2020 гг.). Наименьшие значения ЭЭТ в 1966–1976 гг. отмечались на станции Витебск ($-5,8^{\circ}\text{C}$), в 1977–1998 гг. – на станции Могилёв ($-5,9^{\circ}\text{C}$), а в 1999–2020 гг. – на станции Горки ($-3,5^{\circ}\text{C}$). Средние значения ЭЭТ за сезон выросли с $-4,1^{\circ}\text{C}$ в 1966–1976 гг. до $-0,5^{\circ}\text{C}$ в 1999–2020 гг.

Рассмотрим изменения эффективной и эквивалентно-эффективной температур за период 1977–1998 гг. относительно средних значений за 1966–1976 гг. по месяцам (рис. 7). Наиболее интенсивный прирост значений индексов отмечался в январе: значения TE в среднем выросли на $2,7^{\circ}\text{C}$, а ЭЭТ – на $4,2^{\circ}\text{C}$. Наибольший прирост TE и ЭЭТ в этот месяц отмечался в Витебске ($3,3^{\circ}\text{C}$ и $6,1^{\circ}\text{C}$ соответственно), наименьший прирост TE наблюдался в Бресте (на 2°C), а ЭЭТ – в Гродно (на $2,3^{\circ}\text{C}$). В ноябре происходило наибольшее снижение значений индексов или наиболее низкие темпы прироста. Так, в среднем значения TE за ноябрь в этот период снизились на $0,7^{\circ}\text{C}$, а значения ЭЭТ выросли на $0,1^{\circ}\text{C}$. Максимальное снижение TE и ЭЭТ произошло в Могилёве (на $1,2^{\circ}\text{C}$ и $1,5^{\circ}\text{C}$ соответственно); в Витебске снижение TE за ноябрь было минимальным и составило $0,5^{\circ}\text{C}$, а в Пинске отмечался прирост ЭЭТ на $1,6^{\circ}\text{C}$. Выявленный характер изменений связан с изменениями температуры воздуха: в период 1966–1976 гг. в январе регулярно отмечались волны холода, когда среднесуточная температура опускалась ниже -20°C на протяжении нескольких суток, а в ноябре и декабре 1977–1998 гг. в Беларуси наблюдалось незначительное снижение средних значений температуры. Изменения ЭЭТ оказались менее контрастны, поскольку они были «скомпенсированы» устойчивым снижением средней скорости ветра. В целом до начала 2000-х гг. изменения средних значений TE по месяцам колебались в пределах от $-0,5^{\circ}\text{C}$ до $+1^{\circ}\text{C}$, а изменения ЭЭТ – от -1°C до $+2^{\circ}\text{C}$. На станции Могилёв чаще, чем на остальных, фиксируется снижение значений индексов, что связано с переносом основного пункта наблюдений в аэропорт за черту города в 1972 г. [12].

Изменения значений индексов за период 1999–2020 гг. относительно 1977–1998 гг. характеризуются их повсеместным приростом – редкие исключения обусловлены пропусками в рядах данных, поскольку в 2013 г. часть станций была закрыта или переведена на сокращенную программу наблюдений [12]. Темпы повышения значений индексов были неодинаковы на протяжении года: так, наиболее интенсивное повышение индексов комфортности отмечалось в периоды февраль – апрель, июль – август и ноябрь – декабрь; последние два периода были наиболее выразительными. Наименее интенсивное повышение значений индексов отмечалось в мае, июне и октябре.

Особенности изменений значений TE , ЭЭТ и энтальпии за февраль, май, июль, ноябрь и декабрь показаны на рис. 8–10. В среднем за февраль значения TE выросли на $0,9^{\circ}\text{C}$, при этом изменения варьировались от $-0,8^{\circ}\text{C}$ в Пружанах до $+1,4^{\circ}\text{C}$ в Воложине относительно среднего за 1977–1998 гг. Изменения энтальпии в феврале составляли от $-0,2$ ккал/кг в Пружанах до $+0,6$ ккал/кг в Воложине при среднем значении $+0,3$ ккал/кг. Изменения ЭЭТ колебались от $-2,3^{\circ}\text{C}$ до $+5,4^{\circ}\text{C}$ при среднем значении $+2,8^{\circ}\text{C}$. Интересно отметить, что в период 1999–2020 гг. наименьший прирост значений ЭЭТ на всем протяжении года фиксировался на станции Пружаны, а наибольший – на станции Вилейка, что связано с упомянутыми ранее факторами. В мае изменения TE составили от $-0,4^{\circ}\text{C}$ в Могилёве до $+0,3^{\circ}\text{C}$ в Бресте при среднем приросте порядка $0,04^{\circ}\text{C}$, изменения ЭЭТ составили от $-0,3^{\circ}\text{C}$ до $+2,9^{\circ}\text{C}$ при среднем приросте на $1,2^{\circ}\text{C}$, а прирост энтальпии варьировался от $0,02$ ккал/кг в Ганцевичах до $0,6$ ккал/кг в Брагине при средней величине $0,3$ ккал/кг. В июле прирост значений TE составил от $1,5^{\circ}\text{C}$ в Езерище до $2,1^{\circ}\text{C}$ в Лельчицах, а средний по стране прирост значений индекса составил $1,8^{\circ}\text{C}$; прирост значений ЭЭТ составил от $1,8^{\circ}\text{C}$ до $4,7^{\circ}\text{C}$ при среднем значении $+3,1^{\circ}\text{C}$; прирост энтальпии составил от 1 ккал/кг в Новогрудке до $1,6$ ккал/кг в Брагине при среднем значении $1,2$ ккал/кг. В октябре изменения TE составили $-0,1^{\circ}\text{C}$ в Горках до $+0,7^{\circ}\text{C}$ в Витебске при среднем приросте около $0,4^{\circ}\text{C}$, изменения ЭЭТ составили от $-0,4^{\circ}\text{C}$ до $+4,4^{\circ}\text{C}$ при среднем приросте на $2,1^{\circ}\text{C}$, а прирост энтальпии составил от $0,2$ ккал/кг в Пружанах до $0,6$ ккал/кг в Брагине при средней величине $0,4$ ккал/кг. В декабре прирост значений TE составил от $0,6^{\circ}\text{C}$ в Пружанах до $2,9^{\circ}\text{C}$ в Докшицах при средней величине $1,8^{\circ}\text{C}$, а изменения значений ЭЭТ составили от $-0,4^{\circ}\text{C}$ до $+6,1^{\circ}\text{C}$ при среднем приросте на $3,3^{\circ}\text{C}$. Для изменений значений энтальпии более характерным месяцем является ноябрь, и прирост значений индекса в этот период составил от $0,7$ ккал/кг в Гродно до 1 ккал/кг в Новогрудке при средней величине $0,9$ ккал/кг. Если исключить влияние городских островов тепла и пропусков в рядах исходных данных, то полученные темпы изменений достаточно хорошо согласуются с особенностями изменений климата, наблюдаемыми в разных регионах страны.

В период с февраля по апрель изменения ЭЭТ более интенсивны, чем изменения TE , что во многом связано с особенностями изменений средней скорости ветра на отдельных станциях: так, на станциях западной половины Минской области снижение скорости ветра было более существенным, чем в среднем по республике, а на таких станциях, как Докшицы, – меньшим (см. рис. 9). Изменения значений энтальпии находятся в тесной зависимости от испарения, поэтому в период с февраля по

апрель их прирост незначителен или отсутствует, а в июле максимален. Относительно высокий прирост значений энтальпии в ноябре и декабре обусловлен тем, что в эти месяцы одновременно с ростом температуры отмечался также прирост средних значений относительной влажности (на 1–3 %). Для этих месяцев также свойственно существенное снижение средней скорости ветра (на 0,25–0,75 м/с), вследствие чего прирост значений TE и ЭЭТ максимален именно в ноябре и декабре.

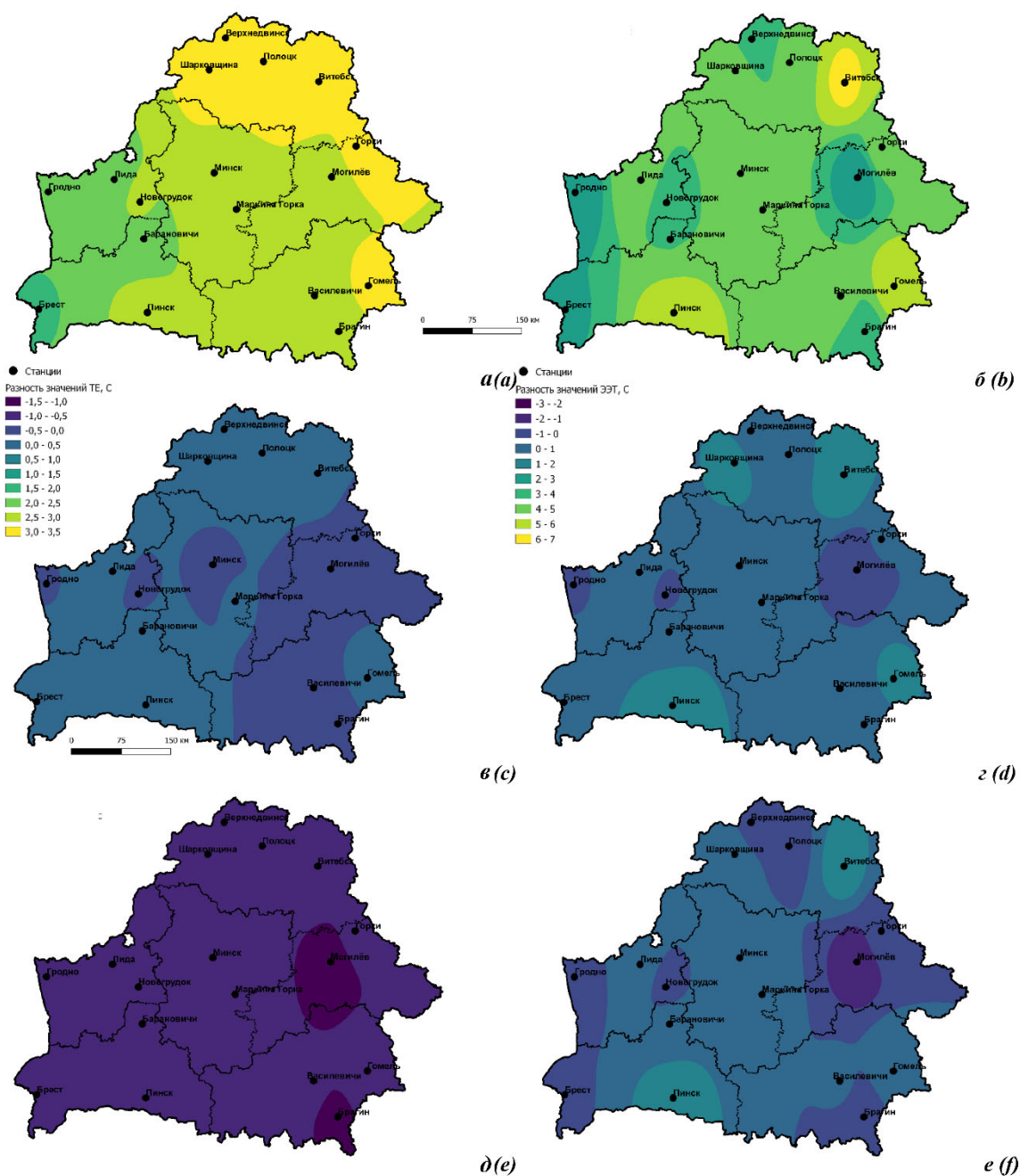
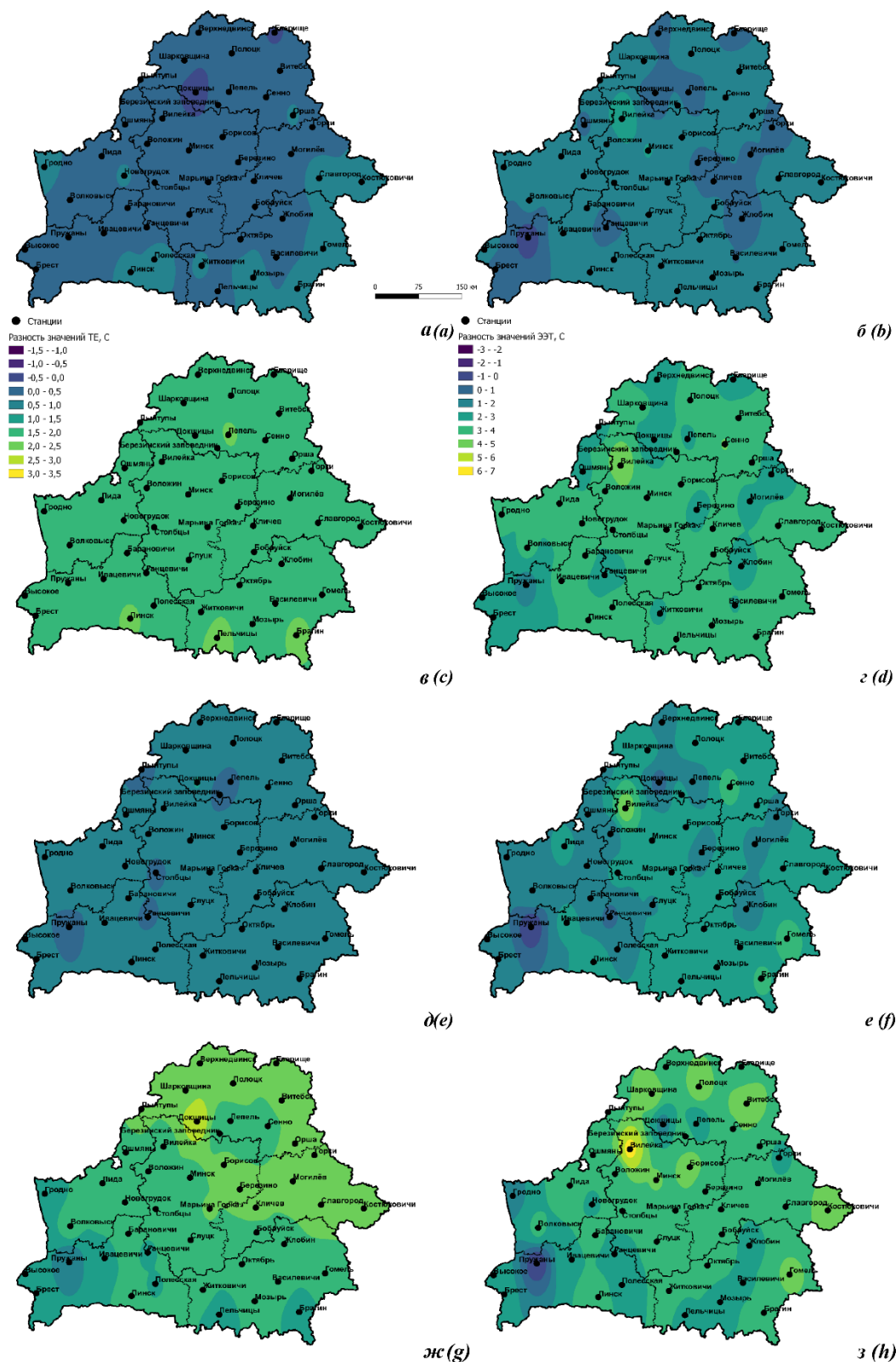


Рис. 7. Изменения средних значений эффективной температуры (TE) (а, в, д) и эквивалентно-эффективной температуры (ЭЭТ) по Миссенарду (б, г, е) за период 1977–1998 гг. относительно 1966–1976 гг. за январь (а, б), май (в, г) и ноябрь (д, е)

Fig. 7. Changes in average values of effective temperature (TE) (a, c, e) and equivalent-effective temperature (EET) by A. Missenard (b, d, f) during 1977–1998 in relation to 1966–1976 in January (a, b), May (c, d) and November (e, f)



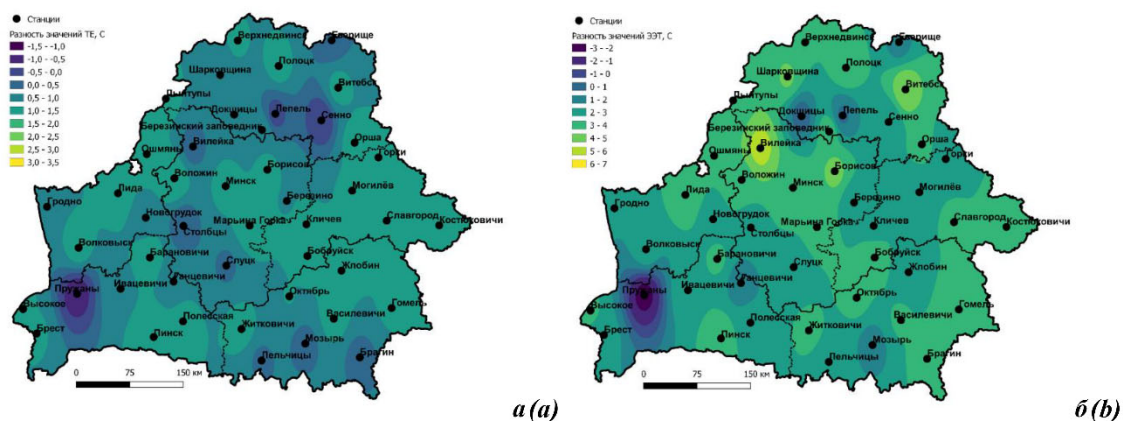


Рис. 9. Изменения средних значений эффективной температуры (TE) (а) и эквивалентно-эффективной температуры (ЭЭТ) по А. Миссенарду (б) за период 1999–2020 гг. относительно 1977–1998 гг. за февраль

Fig. 9. Changes in average values of effective temperature (TE) (a) and equivalent-effective temperature (EET) by A. Missenard (b) during 1999–2020 in relation to 1977–1998 in February

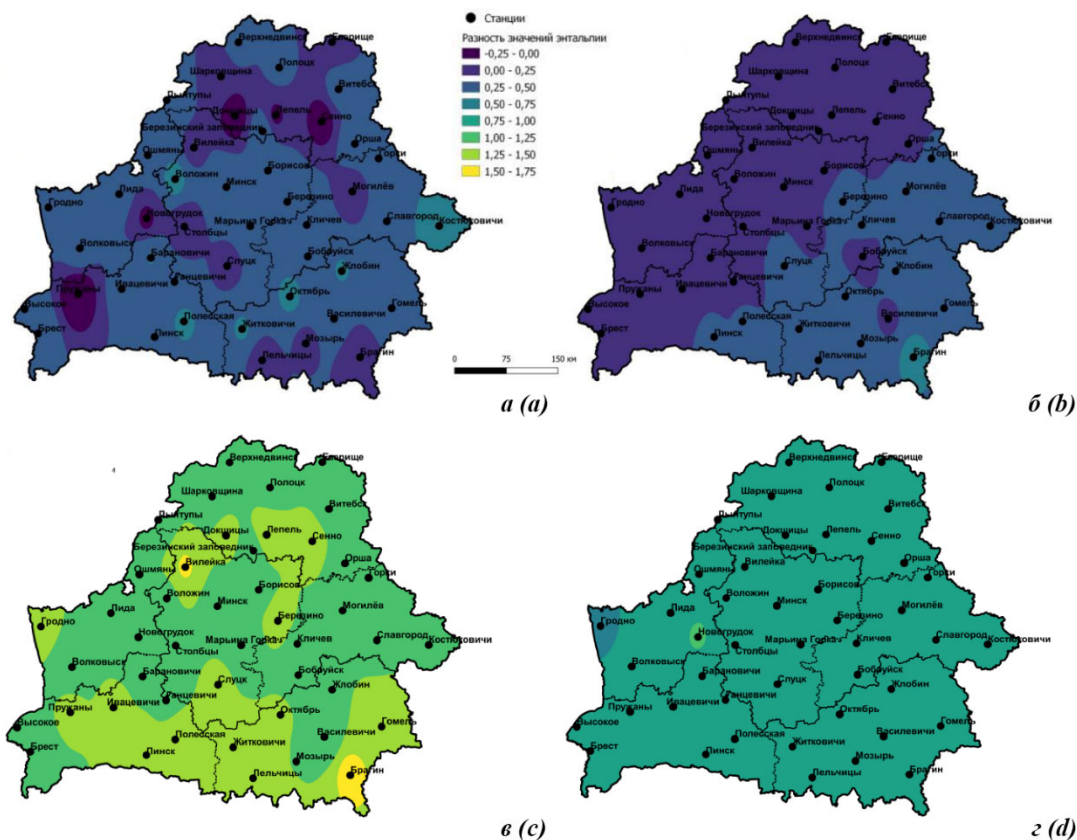


Рис. 10. Изменения средних значений биоклиматического индекса теплосодержания воздуха (БИТ) (энthalпии) за период 1999–2020 гг. относительно 1977–1998 гг. (TE) за февраль (а), май (б), июль (в) и ноябрь (г)

Fig. 10. Changes in bioclimatic heat content index (BHC) values during 1999–2020 in relation to 1977–1998 in February (a), May (b), July (c) and November (d)

Важной особенностью является разность темпов прироста значений индексов комфортности в различные сезоны года: в целом они выше зимой и летом и ниже в переходные сезоны. Наибольший прирост значений TE и ЭЭТ отмечается зимой, а энthalпии – летом; наименьшее значений всех индек-

сов фиксируется осенью. Это согласуется с особенностями изменений температуры на территории Беларуси в отдельные фазы потепления климата [7–9, 11]. Низкие темпы повышения значений индексов осенью связаны с особенностями изменений характеристик влажности: на фоне стабильно повышающейся температуры средняя относительная влажность в осенние месяцы преимущественно сохранялась на одном уровне. В то же время весной относительная влажность устойчиво снижалась, благодаря чему создавались более комфортные условия.

В связи с тем, что для расчета средних значений индексов комфортности использовались среднесуточные данные, это позволяет рассчитать повторяемость их значений для различных градаций комфортности. Результаты этих расчетов приведены в табл. 1–3, из которых видно, что благодаря потеплению повторяемость дней с более теплой и комфортной погодой увеличилась, а доля дней с холодной и очень холодной погодой устойчиво снижается. Сопоставление повторяемости значений TE за периоды 1966–1976 гг. и 1999–2020 гг. показывает, что число дней с очень холодной погодой снизилось вдвое и в настоящее время начали отмечаться дни с жаркой погодой. Анализ изменений ЭЭТ показывает, что за период современного потепления повторяемость дней с экстремально низкой погодой, когда есть угроза обморожения, снизилась в 3 раза. Одновременно с этим повторяемость дней с комфортно теплой погодой выросла в 4–5 раз. Изменения значений энтальпии менее заметны, так как практически на всем протяжении года значение индекса превышает 63 ккал/кг и, таким образом, соответствует критерию комфортной погоды. Снижение повторяемости дней с комфортной погодой в 1999–2020 гг. относительно 1977–1998 гг. связано с пропусками в рядах данных парциального давления водяного пара. В целом пропуски в рядах данных исходных величин являются главной причиной искажений значений повторяемостей.

Результаты, приведенные в настоящей работе, согласуются с результатами работы [13], в которой также рассматривается вопрос изменений биоклиматических характеристик комфортности климата на примере ЭЭТ по Б. А. Айзенштадту и индекса суровости погоды по Бодману. Главные различия между данной статьей и работой [13] заключаются в разной продолжительности рассматриваемых подпериодов: 1966–1976 гг., 1977–2000 гг. и 2001–2020 гг., так как они привязаны к фазам атлантической мультideкадной осцилляции, и разным набором станций, использованных для анализа, из-за чего наблюдается ряд различий в характере пространственного распределения биоклиматических характеристик.

Таблица 1. Повторяемость значений эффективной температуры (TE) за различные периоды по территории Беларуси, %

Table 1. Frequency of specific effective temperature (TE) values for different periods of time on the territory of Belarus, %

Градации, °C / период	1966–2020 гг.	1966–1976 гг.	1977–1998 гг.	1999–2020 гг.
< –30	0,0	0,0	0,0	0,0
–30...–24	0,0	0,0	0,0	0,0
–24...–12	1,7	3,0	2,3	1,5
–12...0	16,6	20,6	20,7	16,8
0...6	19,5	22,1	22,9	21,6
6...12	15,8	17,1	18,6	17,5
12...18	21,3	25,5	25,2	23,1
18...24	7,4	6,5	6,9	10,3
24...30	0,1	0,0	0,0	0,2
> 30	0,0	0,0	0,0	0,0
Пропуски в рядах данных	17,6	5,2	3,3	9,1

Таблица 2. Повторяемость значений биоклиматического индекса теплосодержания воздуха (энтальпии) за различные периоды по территории Беларуси, %

Table 2. Frequency of specific bioclimatic heat content index values for different periods of time in Belarus, %

Градации, ккал/кг / период	1966–2020 гг.	1977–1998 гг.	1999–2020 гг.
< 59	0,0	0,0	0,0
59...61	0,2	0,3	0,2
61...62	0,4	0,6	0,4
62...63	0,9	1,2	1,0
> 63	75,0	92,5	92,3
Пропуски в рядах данных	23,4	5,4	6,2

Таблица 3. Повторяемость значений эквивалентно-эффективной температуры (ЭЭТ) по А. Миссенарду за различные периоды по территории Беларуси, %**Table 3. Frequency of specific equivalent-effective temperature (EET) by A. Missenard values for different periods of time in Belarus, %**

Градации, °С / период	1966–2020 гг.	1966–1976 гг.	1977–1998 гг.	1999–2020 гг.
< –24	3,1	6,8	4,3	2,3
–24...–18	5,4	7,7	7,5	4,6
–18...–2	11,2	14,8	14,1	11,0
–12...–6	13,4	13,4	15,5	15,5
–6...0	11,0	11,0	12,5	12,8
0...6	12,1	13,9	14,3	13,2
6...12	15,2	17,2	17,7	16,9
12...18	10,1	9,3	10,1	13,5
18...24	1,4	0,6	0,7	2,8
24...30	0,0	0,0	0,0	0,0
> 30	0,0	0,0	0,0	0,0
Пропуски в рядах данных	17,0	5,3	3,3	7,4

Закключение. Главной особенностью пространственно-временных изменений биоклиматических индексов комфортности на протяжении рассматриваемого периода (1966–2020 гг.) является то, что их значения устойчиво повышались. Наиболее интенсивный рост их значений связан с началом активной фазы потепления климата, т. е. с 1988 г. Рост температур оказался не единственным фактором изменений значений индексов: рост значений ЭЭТ во многом связан со снижением средней скорости ветра, происходившим параллельно с потеплением климата; на значения БИТ большое влияние оказало изменение испаряемости, обусловленное ростом температуры.

Интенсивность повышения значений индексов менялась в зависимости от месяца и сезона года. До 1980-х гг. эти изменения были небольшими и относительно равномерными, однако в период потепления равномерный характер изменения индексов комфортности нарушается. Сопоставление значений индексов для периодов 1999–2020 гг. и 1977–1998 гг. показывает, что наибольшее повышение значений индексов отмечалось в периоды с июля по август и с ноября по декабрь, а в мае, июне и октябре наблюдался их наименее интенсивный рост. Данный характер изменений обусловлен наложением особенностей изменений температур в различные сезоны года, характерных для фаз потепления климата и особенностями изменений характеристик влажности.

Таким образом, развивающееся потепление климата привело к повышению комфортности погодно-климатических условий в Беларуси. Другие метеорологические характеристики (скорость ветра и влажность атмосферного воздуха) существенно корректируют особенности пространственно-временных изменений использованных индексов комфортности.

Список использованных источников

1. Ткачук, С. В. Обзор индексов степени погодных условий и их связь с показателями смертности // Труды ФГБУ «Гидрометцентр России» «Гидрометеорологические прогнозы». – М., 2012. – Вып. 347. – С. 223–245.
2. Логинов, В. Ф. Изменения биоклиматических индексов комфортности климата для человека на территории Беларуси за период с 1966 по 2020 г. / В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков // Гидрометеорология и образование. – 2021. – № 4. – С. 6–19.
3. Виноградова, В. В. Воздействие климатических условий на человека в засушливых землях Европейской России / В. В. Виноградова // Известия РАН. Серия географическая. – 2012. – № 2. – С. 68–81.
4. Виноградова, В. В. Биоклиматические индексы в оценке воздействия современного потепления климата на условия жизни населения России // Известия РАН. Серия географическая. – 2009. – № 3. – С. 82–89.
5. Система обслуживания гидрометеорологической информацией CliWare [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cliware.meteo.ru/meteo/>. – Дата доступа: 09.12.2021.
6. Государственное учреждение «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (Белгидромет) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belgidromet.by/>. – Дата доступа: 09.12.2021.
7. Логинов, В. Ф. Сезонные особенности изменения климата Беларуси / В. Ф. Логинов, Ю. А. Бровка // Природопользование. – 2014. – Вып. 25. – С. 16–22.
8. Логинов, В. Ф. Современные изменения регионального и глобального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 314 с.
9. Логинов, В. Ф. Изменения климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 218 с.

10. QGIS Project [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qgis.org/ru/site/>. – Дата доступа: 10.01.2022.
11. Хитриков, М. А. Оценка изменений и прогноз биоклиматического потенциала территории Беларуси : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.03.08 / М. А. Хитриков ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск, 2021. – 24 с.
12. Справочник по климату Беларуси. История и физико-географическое описание гидрометеорологических станций / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, Департамент гидрометеорологии, Республиканский гидрометцентр ; ред.: М. А. Гольберг. – Минск : Республиканский гидрометеорологический центр Республики Беларусь, 2003. – 76 с.
13. Логинов, В. Ф. Изменение биоклиматического потенциала Республики Беларусь / В. Ф. Логинов, О. Г. Савич-Шемет, М. А. Хитриков // Природные ресурсы. – 2022. – № 1. – С. 16–24.

References

1. Tkachuk S. V. *Obzor indeksov stepeni komfortnosti pogodnyh usloviy i ih svyaz' s pokazatelyami smertnosti* [Overview of climate comfort level indexes and their relation to mortality characteristics]. *Trudy FGBU "Gidrometcentr Rossii" "Gidrometeorologicheskie prognozy"* [Proc. of the Hydrometeorological Center of Russia]. 2012, vol. 347, pp. 223–245. (in Russian)
2. Loginov V. F., Khitrykau M. A. *Izmeneniya bioklimaticheskikh indeksov komfortnosti klimata dlya cheloveka na territorii Belarusi za period s 1966 po 2020 gg.* [Change of bioclimatic indexes of climate comfort level for humans in Belarus from 1966 to 2020] *Gidrometeorologiya i obrazovanie = Hydrometeorology and education*, 2021, no. 4, pp. 6–19. (in Russian)
3. Vinogradova V. V. *Vozdeystvie klimaticheskikh usloviy na cheloveka v zasushlivykh zemlyakh Evropeyskoy Rossii* [Effect of climate conditions on humans in arid lands of European Russia]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2012, no. 2, pp. 68–81. (in Russian)
4. Vinogradova V. V. *Bioklimaticheskie indeksy v otsenke sovremennogo potepleniya na usloviya zhizni naseleniya Rossii* [Bioclimatic indexes in estimation of effect of modern climate warming on living conditions of population of Russia]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2009, no. 3, pp. 82–89. (in Russian)
5. *Sistema obluzhivaniya gidrometeorologicheskoy informatsiy CliWare* [CliWare. System for hydrometeorological information management]. Available at <http://cliware.meteo.ru/meteo/> (accessed 9 December 2021). (in Russian)
6. *Gosudarstvennoye uchrezhdenie "Respublikanskiy centr po gidrometeorologii, kontrolyu radioaktivnogo zagryazneniya i monitoringu okrizhayushchey sredy" (Belgidromet)* [State institution "Republican center for hydrometeorology, control of radioactive contamination and environmental monitoring"]. Available at <https://www.belgidromet.by/> (accessed 9 December 2021). (in Russian)
7. Loginov V. F., Brovka Y. A. *Sezonnye osobennosti izmeneniya klimata Belarusi* [Seasonal features of climate changes in Belarus]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2014, issue 25, pp. 16–22. (in Russian)
8. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Sovremennye izmeneniya regional'nogo i global'nogo klimata* [Modern changes in regional and global climate]. Minsk, 2019, 314 p. (in Russian)
9. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, and regulatory opportunities]. Minsk, 2020. 218 p. (in Russian)
10. QGIS Project [Electronic resource]. Available at <https://www.qgis.org/ru/site/> (accessed 10 January 2022).
11. Khitrykau M. A. *Otsenka izmeneniy i prognoz bioklimaticheskogo potentsiala Belarusi* [Estimation of changes and forecast of bioclimatic potential of Belarus]. Abstract of cand. of geogr. sci. thesis. 25.03.08. NAS of Belarus, Institute of Nature Management. Minsk, 2021. 24 p. (in Russian)
12. *Spravochnik po klimatu Belarusi. Istoriya i fiziko-geograficheskoye opisanie gidrometeorologicheskikh stantsiy* [Source book on climate of Belarus, History and physico-geographical description of hydrometeorological stations], ed. by M. A. Golberg. Minsk, Hydrometeorological center of the Republic of Belarus, 2003. 76 p. (in Russian)
13. Loginov V. F., Savich-Shemet O. G., Khitrykau M. A. *Izmenenie bioklimaticheskogo potentsiala Respubliki Belarus'* [Change of bioclimatic potential of Republic of Belarus]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2022, no. 1, pp. 16–24. (in Russian)

Информация об авторах

Логинов Владимир Федорович – академик, доктор географических наук, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Хитриков Максим Александрович – кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: m.a.hitrykau@gmail.com

Information about authors

Vladimir F. Loginov – Academician, 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: info@nature-nas.by

Maksim A. Khitrykau – Ph. D. (Geography), Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: m.a.hitrykau@gmail.com

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

Савич-Шемет Оксана Григорьевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: savichoks@yandex.ru

Polina A. Zaiko – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Polly_LO@tut.by

Oksana G. Savich-Shemet – 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: savichoks@yandex.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-22-35>
УДК 504.5:631.41

Поступила в редакцию 10.05.2022
Received 10.05.2022

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РИСКОВ В СВЯЗИ С ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ПОЧВ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ (НА ОСНОВЕ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА)

М. И. Козыренко, Т. И. Кухарчик

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Оценка экологического риска в связи с загрязнением почв является одним из важных элементов эффективного управления загрязненными территориями, поскольку позволяет выявить наиболее важные пути поступления загрязняющих веществ в организм человека и определить опасность загрязнения почв с точки зрения воздействия на здоровье человека. В городах особого внимания заслуживают территории промышленных предприятий, подлежащие освоению и преобразованию в городские ландшафты.

Проанализированы методические подходы к оценке опасности в связи с загрязнением почв, базирующиеся на концепции риска для здоровья населения. Охарактеризованы модели CalTOX, USETox, MMSoils, 3MRA, SADA и другие, разработанные и используемые в зарубежных странах.

Показано, что для практического применения в Беларуси наибольшими преимуществами обладает модель SADA в связи с ее доступностью и встроенными GIS-технологиями, что дает возможность в короткие сроки получить визуальную ориентировочную картину распределения рисков. Выполнена апробация данной модели для постпромышленной территории, расположенной в г. Минске, при условии размещения на ней жилой застройки. В качестве исходных данных использованы результаты выборочного обследования промплощадки и определения содержания тяжелых металлов в почве. На примере цинка и кадмия показано, что их замеренные концентрации при ингаляционном, пероральном и контактном путях поступления не представляют значимого риска для здоровья взрослых и детей. Установлено, что для рассмотренной территории возможна смена функционального назначения, в том числе использование под жилую застройку, без принятия мер по очистке. Продемонстрированы уровни содержания кадмия в почвах, представляющие опасность возникновения неканцерогенных эффектов при проживании на такой территории.

Ключевые слова: загрязнение почв; тяжелые металлы; постпромышленная территория; оценка рисков.

Для цитирования. Козыренко М. И., Кухарчик Т. И. Подходы к оценке рисков в связи с загрязнением почв на урбанизированных территориях (на основе зарубежного опыта) // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 22–35.

APPROACHES TO RISK ASSESSMENT ASSOCIATED WITH SOIL CONTAMINATION IN URBAN AREAS (BASED ON FOREIGN EXPERIENCE)

M. I. Kazyrenka, T. I. Kukharchyk

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

Abstract. Environmental risk assessment associated with soil contamination is one of the most important elements of effective management of contaminated sites, since it allows to identify the most important intake routes of contaminants to the human organism and to determine the risk of soil contamination in terms of impact on human health. The territories of industrial enterprises that are a subject to development and transformation into urban landscapes deserve special attention in cities.

Methodological approaches to hazard assessment due to soil contamination based on the concept of risk to public health are analyzed. Models CalTOX, USETox, MMSoils, 3MRA, SADA and others that are developed and used in foreign countries, are characterized.

It is shown that the SADA model has the maximum advantage for the practical application in Belarus due to its availability and built-in GIS technologies, which make it possible to obtain a visual indicative picture of the risks distribution. The SADA model has been tested for a post-industrial site located in Minsk, subject to use as a residential area. The results of a selective investigation of the industrial site and the determination of the heavy metals content in the soil as initial data were used. On the example of zinc and cadmium, it has been demonstrated that their measured concentrations do not pose a significant risk to the health of adults and children by inhalation, oral and contact intake routes. It has been established that it is possible to change the functional use of the territory, including the residential use, without soil cleanup

activities. The levels of cadmium content in soils, which pose risk of non-carcinogenic effects for humans living in the territory are demonstrated.

Keywords: soil contamination; heavy metals; post-industrial site; risk assessment.

For citation. Kazyrenka M. I., Kukharchyk T. I. Approaches to risk assessment associated with soil contamination in urban areas (based on foreign experience). *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 22–35.

Актуальность. Загрязнение почв является одной из актуальных экологических проблем современности [1, 2]. Особого внимания заслуживают территории бывших промышленных предприятий, прекративших свое функционирование либо вынесенные за городскую черту [3]. Высвобождение больших промышленных площадей в пределах города в большинстве случаев предполагает смену их функционального использования. Однако изменение целевого назначения промплощадок – задача сложная, включающая проведение работ по оценке их состояния, очистке и восстановлению. Оценка опасности загрязнения почв для здоровья человека является важным элементом управления городскими территориями.

Накопленные к настоящему времени данные свидетельствуют о загрязнении почв промплощадок различными химическими веществами/соединениями, перечни и уровни накопления которых определяются специализацией предприятий, историей деятельности и другими факторами [4–6]. Действующая в настоящее время система нормирования почв в Беларуси устанавливает предельные концентрации загрязняющих веществ, в то же время значения для принятия решения о ремедиации почв не разработаны; ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) для многих загрязняющих веществ по сути утратили статус, поскольку не обновлялись; оценка опасности загрязнения почв может быть выполнена только на качественном уровне в соответствии с разработанной еще в 2004 г. Инструкцией по гигиенической оценке населенных мест [7]. Имеются сложности в практическом применении дифференцированных нормативов содержания химических веществ в почвах, принятых в 2020 г. [8].

В связи с этим важным представляется применение методов оценки опасности загрязнения почв на основе концепции риска, получивших развитие в странах Западной Европы, а также в США, Канаде, Австралии [9–12]. Оценка экологического риска в связи с загрязнением почв является одним из важных элементов эффективного управления загрязненными территориями, поскольку позволяет выявить наиболее важные пути поступления загрязняющих веществ в организм человека, определить опасность загрязнения почв с точки зрения воздействия на здоровье человека, ранжировать загрязненные территории по приоритетности природоохранных мер.

Цель работы – провести анализ современных инструментов для оценки рисков, осуществить выбор и апробацию одной из моделей на примере постпромышленной территории.

Методы и объекты исследований. Проанализированы различные программные инструменты и модели, позволяющие получить качественные и количественные оценки рисков от загрязнения почв, в том числе CLEA, CalTOX, UseTOX, MMSoils, SADA и др.

В качестве модельного объекта для оценки опасности для здоровья человека от загрязнения почв выбрана территория бывшего промышленного предприятия в г. Минске (рис. 1), специализировавшегося на производстве вычислительного оборудования.

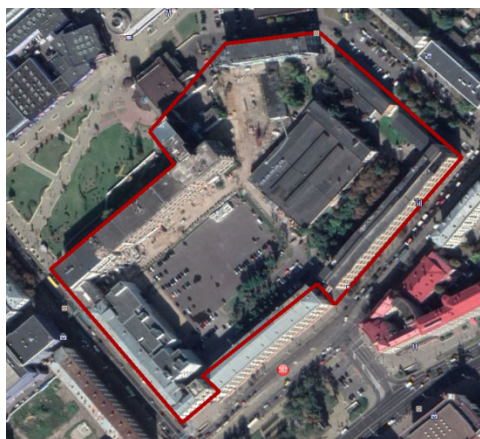


Рис. 1. Территория бывшей промышленной площадки в центральной части г. Минска

Fig. 1. The post-industrial territory in the center of Minsk

Обследование территории с отбором проб почв проведено в 2018 г. после прекращения работы предприятия и начала работ по демонтажу производственных корпусов. В отобранных субстратах в ряде случаев наблюдались превышения ПДК/ОДК по тяжелым металлам (цинку, свинцу, кадмию, никелю). Наиболее высокие концентрации относительно установленных нормативных уровней (до нескольких десятков раз) на отдельных участках опробования обнаруживались для кадмия и цинка, что обусловило их выбор в качестве элементов, от которых оценивались риски для человека в данной работе. Диапазон концентраций кадмия в почве и техногенных субстратах на бывшей промплощадке составил н. о. – 10,93 мг/кг, цинка – 19,51–1657,2 мг/кг. Максимальные уровни тяжелых металлов обнаружены в центральной части промплощадки в непосредственной близости от мест размещения основных производственных цехов.

Оценка опасности в связи с загрязнением почв проведена с помощью модели SADA. Для демонстрации возможностей данного инструмента также оценены риски при 10-кратном повышении исходных концентраций тяжелых металлов.

В качестве величины приемлемого риска принималось значение $1 \cdot 10^{-6}$, что означает применительно к канцерогенным веществам один дополнительный случай онкологических заболеваний на миллион человек. При расчете опасности возникновения неканцерогенных эффектов, если рассчитанный коэффициент опасности (HQ) вещества не превышает единицу, то вероятность развития у человека вредных эффектов при ежедневном поступлении вещества в течение жизни незначительна и такое воздействие характеризуется как допустимое. Если коэффициент опасности превышает единицу, то вероятность возникновения вредных эффектов у человека возрастает пропорционально увеличению HQ , однако точно указать величину этой вероятности невозможно [13].

Результаты и их обсуждение. Структура анализа риска включает в себя оценку риска, управление риском, обмен информацией. На основании полученной оценки принимаются решения по управлению загрязненными территориями с учетом политических, социальных, экономических и технических факторов.

Одним из наиболее важных шагов в оценке риска, когда прогнозируется или оценивается количество изучаемого вещества, попадающего в организм человека, является оценка воздействия [14].

В наиболее общем виде расчет оценки воздействия проводится по формуле (1)

$$CDI = ATR \frac{C}{B}, \quad (1)$$

где CDI – воздействие или поглощенная доза, мг/кг массы тела в день; A – скорость (величина) поступления с исследуемой средой, г/день; T – продолжительность воздействия, дней; R – величина ресорбции в день; C – концентрация химического вещества в рассматриваемой среде, мг/г; B – масса тела, кг.

Расчеты рисков и коэффициентов опасности осуществляются в соответствии с формулами (2) и (3).

$$Risk = CDI CF, \quad (2)$$

где $Risk$ – вероятность развития онкологического заболевания у индивидуума в течение жизни (индивидуальный риск); CDI – воздействие или поглощенная доза, мг/кг массы тела в день; SF – фактор потенциального риска (фактор наклона), $(1 / \text{мг/кг массы тела в день})^{-1}$.

$$HQ = \frac{CDI}{RfD}, \quad (3)$$

где HQ – коэффициент опасности; CDI – воздействие или поглощенная доза, мг/кг массы тела в день; RfD – хроническая референтная доза, мг/кг массы тела в день.

Среди наиболее часто учитываемых путей воздействия указываются: ингаляционный (вдыхание воздуха или частиц), пероральный (поступление в организм воды, почвы, пыли, пищевых продуктов, питьевой воды), контактный (абсорбция кожей). Кроме того, опасные вещества могут попадать в кровоток напрямую, например через раны на кожных покровах. Более подробно методика оценки воздействия через различные пути поступления загрязняющих веществ в организм и расчета рисков для здоровья человека описана в работе [15] на примере оценки рисков от загрязнения почв полихлорированными бифенилами. Подходы к оценке опасности для неканцерогенных и канцерогенных веществ различаются: для первых разработана пороговая концепция риска, для вторых – беспороговая.

Анализ моделей для оценки рисков. В настоящее время в ряде стран разработаны различные программные инструменты, позволяющие получить качественные и количественные оценки рисков от загрязнения различных природных сред, в том числе почв. Инструментарий и модели, предназначенные для оценки риска от загрязненных территорий, начали разрабатываться еще в 1990-х годах в США, а затем и в других странах. В настоящее время имеются широкие возможности для получения оценок экологического риска на базе самых различных разработок: CLEA, CalTOX, UseTOX, MMSoils, SADA и др.

CalTox. Разработанная в 1993 г. Департаментом контроля токсических веществ США и Калифорнийским агентством по охране окружающей среды модель CalTOX ранее широко использовалась в научных исследованиях для оценки рисков от загрязненных территорий для большого перечня загрязняющих веществ: пестицидов, ПАУ, ПХБ [16–18], и в свое время считалась наилучшей для оценки канцерогенных рисков. Современная версия CalTOX создана на базе Excel, поддерживается и дорабатывается сотрудниками Техасского университета (США). Свободный доступ к модели отсутствует.

Данная модель состоит из двух блоков: мультимедийной модели переноса и трансформации и модели воздействия на человека. Она позволяет оценить распределение химических веществ между атмосферой, водой, почвой и биотой.

CalTOX не используется для ландшафтов (территорий), в которых вода занимает более 10 % площади поверхности земли, а также на участках площадью менее 1000 м². Кроме того, модель предназначена для моделирования очень низких уровней загрязнения и неприменима в случае, если концентрация загрязняющих веществ превышает предел растворимости в любой из фаз.

К настоящему времени на базе CalTOX созданы современные версии моделей для оценки воздействий UseTOX и TRACI.

USETox. Среди существующих экологических моделей, позволяющих оценивать токсическое воздействие на экосистемы и здоровье человека, отдельного внимания заслуживает модель USEtox, разработанная Обществом экологической токсикологии и химии (SETAC) в 2010 г. и рекомендованная для использования мировым научным сообществом. Последняя обновленная версия модели выпущена в ноябре 2019 г. USEtox 2.0x реализована в табличном формате Microsoft Excel®.

Данная модель охватывает два пространственных масштаба: континентальный и глобальный [14]. Одним из ее преимуществ является учет многофакторности воздействия химических элементов: принимается во внимание их поступление ингаляционным и пероральным путями. Другим серьезным достоинством, представляющим уникальность модели и актуальность ее использования в контексте экологических исследований, является учет специфических ландшафтно-географических и климатических особенностей территории.

Используемые в USEtox данные получают из существующих баз данных и литературных источников [19]. Имеющиеся входные параметры, включающие физико-химические свойства веществ, сосредоточены в двух базах данных: по органическим и неорганическим веществам. Причем перечень неорганических веществ включает в себя 27 металлов, а органических веществ – более 3000 различных соединений, в том числе пестицидов.

Для характеристики поступления химических веществ с точки зрения токсичного воздействия на человека и (или) экосистемы, в USEtox требуются входные данные для веществ, различных сред и сценариев воздействия. Данные по средам в разных пространственных масштабах и сценариях воздействия уже заложены в USEtox, в то время как для отдельных веществ требуются конкретные входные данные, вносимые пользователем, относящиеся к интересующим продуктам или системам продуктов, такие как химическая идентификация и соответствующие данные по массам.

Основным результатом использования USEtox является база данных «рекомендуемых» и «индикационных» факторов токсичности для человека и экотоксичности в пресной воде, основанная на моделировании судьбы окружающей среды, параметров воздействия и эффектов [19].

MMSoils (DOS). Модель MMSOILS (Multimedia Contaminant Fate, Transport, and Exposure Model) оценивает воздействие на человека, риск для здоровья, связанный с поступлением загрязняющих веществ от опасных отходов. Создана в 1997 г., работает в операционной среде MS DOS.

Методология основывается на мультимедийной модели, в которой рассматривается поступление химического вещества в грунтовые и поверхностные воды, атмосферу, почвы и накопление в пищевой цепи. Рассматриваемые пути воздействия на человека: попадание с почвой, вдыхание летучих и твердых частиц, контакт с кожей, поступления: с питьевой водой; потреблением рыбы и растениеводческой продукции, выращенной на загрязненной почве; животных продуктов от скота, пасущегося на загрязненном пастбище [20]. Методология обеспечивает оценку воздействия на человека как по отдельным направлениям, так и комбинированное с учетом всех рассматриваемых путей. Риск, связанный с общей дозой воздействия, рассчитывается на основе данных о химической токсичности.

Данная модель используется как инструмент скрининга и относительного сравнения различных мест складирования отходов, восстановительных работ и оценки опасности. Поскольку неопределенности предполагаемого риска могут быть довольно большими (в зависимости от характеристик площадки и имеющихся данных), MMSOILS устраняет их с помощью анализа Монте-Карло [20].

3MRA (Windows). Технология 3MRA разработана в 2003 г. и позволяет проводить оценку потенциальных рисков для здоровья человека и окружающей среды на основе скрининга в результате длительного (хронического) воздействия опасных отходов с учетом различных источников, путей поступления и рецепторов [21]. 3MRA (АООС США) используется для получения скрининговых (нормативных) уровней для химических веществ при хроническом (долговременном) воздействии.

Для проведения типичной оценки на национальном уровне требуется 2–5 дней работы современного персонального компьютера в зависимости от загрязняющего вещества: менее летучие, более гидрофобные вещества остаются возле источника более продолжительный период, требуя таким образом больше времени для моделирования [21].

EUSES 2.1.2. Система оценки веществ Европейского Союза (EUSES) является инструментом поддержки принятия решений, который позволяет государственным органам, исследовательским институтам и химическим компаниям проводить быструю и эффективную оценку общих рисков, связанных с химическими веществами. EUSES предназначена в основном для первоначальной и уточненной оценки риска, а не для комплексной оценки [22].

Структура EUSES представлена в виде набора вложенных шкал. Местный масштаб вложен в региональный масштаб, который, в свою очередь, вложен в континентальный масштаб. Все шкалы разделены на экологические модули, которые включают как минимум воздух, почву, воду и осадки (EUSES).

В качестве рецепторов, рассматриваемых в EUSES в отношении защиты человека и охраны окружающей среды, выступают различные социальные группы людей (рабочие, потребители и люди, подверженные воздействию окружающей среды) и экологические системы (микроорганизмы в системах очистки сточных вод, водные экосистемы, наземные экосистемы, донные экосистемы и хищники).

При наличии литературных данных могут быть рассчитаны такие показатели, как токсичность дозы, фертильная токсичность, токсичность для матери, токсичность для развития, канцерогенный риск и риск развития рака в течение жизни [22].

EUSES была разработана для количественной оценки рисков, связанных с новыми и существующими химическими веществами для окружающей среды. Набор данных, доступных для новых и существующих химических веществ, называется «базовый набор». Доступность данных зависит от типа оцениваемого вещества.

Для модельных расчетов в EUSES необходимы объемы производства вещества в Евросоюзе; объемы использования вещества в Евросоюзе; молекулярная масса; давление паров; коэффициент распределения октанол – вода; растворимость в воде; токсичность в водной среде; биоразлагаемость.

Оценка риска в EUSES является поэтапной процедурой, включающей оценку воздействия и характеристику рисков. Программное обеспечение EUSES выдает результаты автоматически, поэтому его выводы могут содержать ошибки.

CLEA. Модель CLEA разработана Агентством по охране окружающей среды Великобритании и DEFRA (Государственным департаментом, отвечающим за политику в отношении загрязнения земель Великобритании). В ней используются общие предположения о судьбе и переносе химических веществ в окружающей среде и общая концептуальная модель условий на местности и поведения человека для оценки воздействия загрязняющих веществ, содержащихся в почве, на тех, кто потенциально живет, работает и (или) играет на загрязненных участках в течение длительных периодов времени. Программное обеспечение позволяет получить критерии оценки и ввести свои собственные наборы данных по химическим веществам, почве, сооружениям или типам землепользования. Такие критерии могут помочь оценить риски для здоровья человека от хронического воздействия загрязненной почвы при различных типах землепользования. CLEA может быть применена для:

- расчета общих критериев оценки с использованием стандартных предположений о характеристиках и поведении загрязнителей, путях и рецепторах;
- расчета критериев оценки для конкретного объекта, с объединением стандартных допущений с дополнительной информацией для конкретной территории, собранной для уточнения оценки риска;
- сравнения непосредственно предполагаемой среднесуточной экспозиции (ADE) со значением критериев здоровья (HCV), соответствующего концентрациям в окружающей среде для репрезентативного участка.

Данная модель позволяет оценивать воздействие на человека с учетом трех путей воздействия: перорального (в том числе с сельскохозяйственной продукцией), контактного и ингаляционного. Риски рассчитываются при нахождении не только на открытом воздухе, но и внутри помещений.

Во многих случаях оценки, составленные с помощью модели, дают возможность получить обоснованные прогнозы вероятных концентраций при наихудшем сценарии. Точность оценки судьбы и переноса зависит от нескольких наборов параметров: физико-химических свойств загрязнителя почвы и условий площадки, включая тип почвы; ветровые условия и физических размеров здания [23].

Одной из опций программного обеспечения CLEA является сравнение полученных оценок воздействия с установленными значениями критериев здоровья и уровней, при которых длительное воздействие химических веществ в почве на человека является допустимым или представляет минимальный риск.

Скрининговые уровни SGV (основанные на расчете риска) устанавливают концентрацию в почве, при которой общий риск от воздействия почвы через все пути поступления в организм математически не превышает риск, связанный с воздействием какого-либо одного пути проникновения.

SADA. Модель SADA разработана в Институте моделирования окружающей среды Университета Теннесси (США). С помощью данной модели можно определить места отбора проб, провести статистическую обработку данных, пространственное моделирование, анализ неопределенностей, оценить риск, определить дизайн ремедиационных работ. Полученные результаты можно визуализировать при помощи встроенного блока GIS.

Возможности SADA могут использоваться независимо или коллективно для решения конкретных проблем площадки при характеристике загрязненного участка, оценке риска, определении местоположения будущих точек отбора и при разработке корректирующих действий. SADA – развивающийся бесплатный продукт, предназначенный для лиц, выполняющих экологические оценки в поддержку принятия решений.

Модель находится в свободном доступе.

SADA включает модуль по оценке риска для здоровья человека и модуль по оценке экологического риска [24].

При оценке рисков рассматриваются пять типов землепользования:

- жилого назначения;
- промышленного назначения;
- сельскохозяйственного назначения;
- рекреационного назначения;
- проведение экскавационных работ.

При рассмотрении воздействия на здоровье человека используется ряд возможных путей поступления: пероральный, ингаляционный, контактный (через кожу), внешний (для радионуклидов), комбинированный.

Модель снабжена максимально удобным пользовательским интерфейсом.

Для оценки рисков устанавливаются соответствующие модули: риск для здоровья человека (Human health risk) и экологический риск (Ecological risk), использующие в качестве исходных данных базы данных, связанные с моделью. Это данные по токсичности веществ, параметры по рассматриваемым сценариям использования, параметры воздействия, физические параметры вещества, вид статистической обработки данных (для получения скрининговых уровней).

Основными выходными данными при оценке риска для здоровья человека являются скрининговые уровни, называемые предварительными целями очистки (PRG). В соответствии с этими уровнями при сравнении с ними полученных фактических концентраций можно сократить перечень загрязняющих веществ, в отношении которых следует проводить дальнейшие исследования или работы по экскавации. Загрязняющие вещества в концентрациях выше полученного уровня PRG считаются загрязнителями, в отношении которых должны проводиться дальнейшие работы.

Еще одним видом выходных данных является оценка риска для выбранных загрязняющих веществ. Рассчитывается индивидуальный риск для здоровья человека как от отдельных элементов/соединений, так и от их совокупности [25]. Расчет оценки рисков производится в соответствии с методикой США EPA's Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS).

Для визуализации данных об уровнях опасности и рисков для населения используются возможности встроенных ГИС-технологий в программе SADA. При пространственной интерполяции данных не учитывается характер поверхности, т. е. не принимаются во внимание особенности рельефа и почвенные характеристики, что может вести к возникновению ошибок при оценке рисков и их пространственном распределении.

Результаты риска могут быть представлены в стандартном табличном формате или графически. Табличные форматы являются стандартным продуктом оценки риска и включают в себя таблицу значений PRG, таблицы скрининга, сравнивающие репрезентативные значения полученных данных с PRG, и моделирование риска. Также рассчитывается общий риск.

Основные достоинства и недостатки описанных выше инструментов для оценки рисков показаны в табл. 1.

Таблица 1. Основные достоинства и недостатки моделей для оценки риска**Table 1. Advantages and disadvantages of risk assessment models**

Модель	Достоинства	Недостатки/Ограничения
CalTox	Предназначена для моделирования длительных промежутков времени. Учет специфических ландшафтно-географических особенностей территории	Ранние версии программы разработаны в среде MS DOS, более поздние версии отсутствуют в прямом доступе. Весьма ограниченное количество рассматриваемых загрязняющих веществ. Предназначена для моделирования при очень низких уровнях загрязнения. Нижнее ограничение по площади моделируемого участка – 1000 м ² . Отсутствует в свободном доступе
USETox	Учет специфических ландшафтно-географических особенностей территории	Не подходит для небольших загрязненных территорий
MMSoils	Мультимедийность	Используется для скрининга и относительного сравнения мест складирования отходов. Имеющаяся версия работает в операционной среде MS DOS
3MRA	Учет различных путей поступления загрязняющих веществ и рецепторов	Имеются системные ограничения: Windows 98, NT, 2000, XP. Используется для оценки рисков от отходов
EUSES	Удобный интерфейс. Мультимедийность. Свободный доступ к модели	Разработана для использования в странах Евросоюза. Ненадежность получаемых результатов
CLEA	Удобный интерфейс. Возможность: – использования в качестве экспресс-методики на предварительных этапах исследования; – корректировки входных параметров (за счет изменения, дополнения, например, типа землепользования). Свободный доступ к модели	Используется для весьма ограниченного количества химических веществ. Не предусматривает оценку риска от загрязнения подземных вод
SADA 4.1	Удобный интерфейс. Пять сценариев землепользования. Возможность: – планирования дизайна проведения экскавационных работ; – расчета комплексного риска по нескольким загрязняющим веществам; – внесения изменений в величины параметров, заложенных в модель; – визуализации результатов; – использования в том числе для расчета рисков для поверхностных и подземных вод; – отображения данных послойно в 3D формате (если отобраны пробы по глубине). Оценка в том числе рисков от радиоактивных изотопов целого ряда элементов. Свободный доступ к модели	Имеются системные ограничения: ОС – Windows 98, 98 Second Edition, NT 4.0 (SP4 and higher), 2000, ME, XP; в связи с этим имеются проблемы с реализацией 3D визуализации. Ограниченное количество загрязняющих веществ (металлов), по которым имеются исходные токсикологические параметры. При пространственном моделировании не учитываются особенности рельефа местности и почвенных характеристик

Параметры, используемые для оценки рисков в модели SADA. Используемые в модельных расчетах параметры воздействия для жилой застройки представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры воздействия

Table 2. Exposure parameters

Параметр	Единица измерения	Уровень для жилой зоны
Частота воздействия	дней/год	350
Продолжительность воздействия для взрослого	лет	24
Продолжительность воздействия для ребенка	лет	6
Прямое поступление почвы для взрослого	мг/день	100
Прямое поступление почвы для ребенка	мг/день	200
Поглощенная фракция	–	1
Объем вдыхаемого воздуха	м ³ /день	20
Площадь поверхности тела для взрослого	м ² /день	0,53
Фактор сцепления	мг/см ²	1
Масса тела взрослого	кг	70
Масса тела ребенка	кг	15
Продолжительность жизни	лет	70

Физические параметры и данные по токсичности, используемые при расчетах для тяжелых металлов, представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Физические параметры кадмия и цинка, учитываемые при расчете риска для здоровья человека

Table 3. Physical parameters of cadmium and zinc for calculating the human risk

Параметр	Единица измерения	Кадмий	Цинк
Фактор поступления твердых частиц из почвы в воздух	м ³ /кг	1,32E+09	1,32E+09
Фактор дермальной абсорбции	–	0,01	0,001
Константа проницаемости	см/ч	0,00035	0,000342
Коэффициент насыщения	мг/кг	9 260 000	21 400 000

Таблица 4. Данные по токсичности для здоровья человека для кадмия и цинка

Table 4. Human health toxicity data for cadmium and zinc

Параметр	Единица измерения	Кадмий		Цинк	
		Почва	Пища	Почва	Пища
Пероральная референтная доза	мг/кг в день	0,001	0,001	0,3	0,3
Референтная концентрация при субхроническом вдыхании	мг/м ³	0,0009	–	0,3	0,3
Контактная референтная доза	мг/кг в день	0,00001	–	0,06	–
Коэффициент наклона	1/(мг/м ³)	1,8	–	–	–
Субхроническая контактная референтная доза	мг/кг в день	–	–	0,06	–

При учете уровней поступления загрязняющих веществ в организм человека с продуктами, полученными с подсобных хозяйств, в расчетах используются дополнительные параметры: коэффициенты предельных потерь, количество потребляемого корма и почвы домашними животными (коровами) и др.

Пространственное распределение величин опасности и рисков для здоровья человека для большей наглядности показано без учета перекрытых (заасфальтированных, занятых под здания/сооружения) территорий.

Оценка опасности от загрязнения почв кадмием. Для условий городских жилых территорий (в районах многоэтажной застройки) приоритетными являются три основных пути поступления загрязняющих веществ в организм человека, указанных выше.

Результаты качественной оценки показали, что для жилых территорий опасность от загрязнения почв кадмием при имеющихся концентрациях тяжелого металла в почвах может быть связана только с потреблением в пищу детьми растениеводческой и животноводческой продукции, что неактуально для городской многоэтажной застройки (табл. 5).

Таблица 5. Результаты качественной оценки опасности возникновения неканцерогенных эффектов от загрязнения почв кадмием на жилой территории (в формате представления данных в SADA)

Table 5. A qualitative assessment results of the non-carcinogenic hazard from soil contamination with cadmium in a residential area (in the format of data presentation in SADA)

Name	Conc	Ingestion		Inhalation	Dermal	Vegetables	Milk		Beef	Total
		Hazard (Adult)	Hazard (Child)	Hazard (Adult)	Hazard (Adult)	Hazard (Adult)	Hazard (Adult)	Hazard (Child)	Hazard (Adult)	Hazard (Adult)
Cadmium	10,93	No	No	—	No	Yes	No	Yes	No	Yes

Опасность от возникновения неканцерогенных эффектов минимальна: для жилых территорий величина коэффициента опасности в местах с максимальным содержанием кадмия в почвах составляет $9,1 \cdot 10^{-1}$. Это участок в центральной части промплощадки с максимальной концентрацией тяжелого металла в верхнем горизонте почвы (на картосхеме показан красным цветом). На периферийных участках с наименьшим содержанием кадмия вблизи границ промплощадки расчетные уровни коэффициента опасности близки к нулевым значениям (рис. 2).

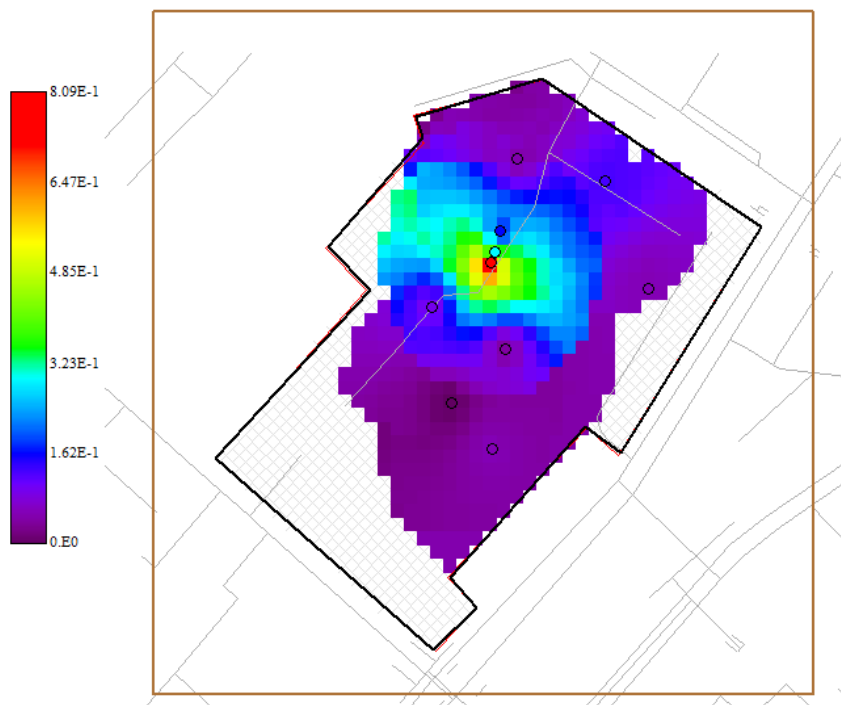


Рис. 2. Картосхема опасности возникновения неканцерогенных эффектов для жилой территории от загрязнения почв кадмием на территории модельного объекта

Fig. 2. A map of the non-carcinogenic hazard from soil contamination with cadmium on the territory of a model object for a residential area

Канцерогенные эффекты от загрязнения почв кадмием учитываются в SADA при поступлении в организм ингаляционным путем. При имеющихся концентрациях в почве значимый риск для здоровья человека отсутствует (табл. 6).

Таблица 6. Результаты качественной оценки риска возникновения канцерогенных эффектов от загрязнения почв кадмием на жилой территории (в формате представления данных в SADA)

Table 6. A qualitative assessment results of the carcinogenic risk from soil contamination with cadmium in a residential area (in the format of data presentation in SADA)

Name	CAS	Conc	Ingestion	Inhalation	Dermal
Cadmium	7440439	10,93	–	No	–

Максимальная обнаруженная концентрация тяжелого металла 10,93 мг/кг соответствует величине риска для жилой территории $6,1 \cdot 10^{-9}$, что указывает на очень низкий уровень потенциального возникновения нежелательных эффектов; на остальных обследованных участках риски для здоровья человека варьируют от 0 до $5 \cdot 10^{-9}$, что на несколько порядков ниже величины приемлемого риска ($1 \cdot 10^{-6}$).

Таким образом, при имеющихся концентрациях кадмия в реальных условиях значимого риска для здоровья населения наблюдаться не будет, пространственное распределение рисков показано на рис. 3.

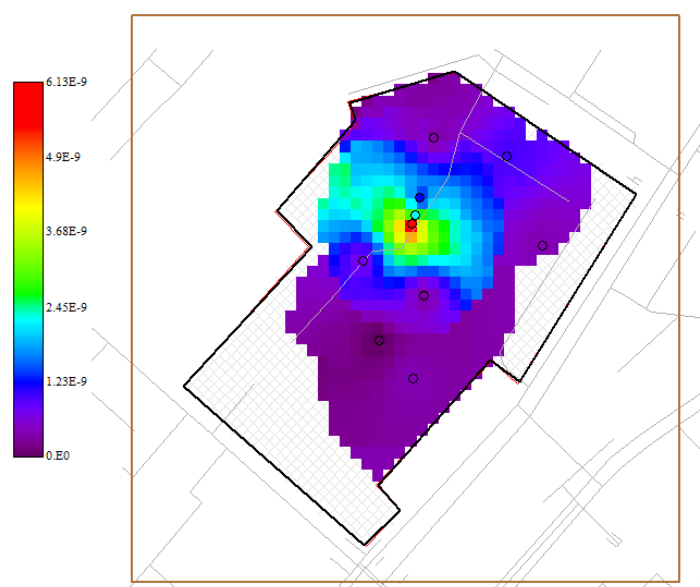


Рис. 3. Картосхема канцерогенных рисков для жилой территории от загрязнения почв кадмием на территории модельного объекта

Fig. 3. A map of the carcinogenic risks from soil contamination with cadmium on the territory of a model object for a residential area

При содержании кадмия в почве в 10 раз выше обнаруженных уровней максимальное содержание достигло бы 109,3 мг/кг. При таком уровне концентраций изменились бы и величины рисков для различных возрастных групп. При условии проживания на такой территории появляется опасность возникновения неканцерогенных эффектов у взрослых и детей (в возрасте до 6 лет). При максимальном уровне концентрации 109,3 мг/кг суммарная величина коэффициента опасности составит 8,1 (табл. 7).

Таблица 7. Результаты качественной и количественной оценки риска возникновения неканцерогенных эффектов от загрязнения почв кадмием на жилой территории при 10-кратном повышении исходных концентраций (в формате представления данных в SADA)

Table 7. A qualitative and quantitative assessment results of the non-carcinogenic hazard from soil contamination with cadmium in a residential area with a 10-fold increase of initial concentrations (in the format of data presentation in SADA)

Name	CAS	Conc	Ingestion		Inhalation	Dermal	Total
			Hazard (Adult)	Hazard (Child)	Hazard (Adult)	Hazard (Adult)	Hazard (Adult)
Cadmium (качественная оценка)	7440439	109,3	No	Yes	–	Yes	Yes
Cadmium (количественная оценка)			1,50E-01	1,40E+00	–	7,90E+00	8,10E+00

Оценка опасности от загрязнения почв цинком. По результатам расчетов даже при максимально обнаруженной концентрации цинка в 1657,2 мг/кг опасность как для взрослого человека, так и для ребенка будет отсутствовать. В данном случае опасность бы представляло проживание на частном подворье с производством собственной сельскохозяйственной продукции при потреблении в пищу растительной продукции, молока и мяса (табл. 8).

Таблица 8. Результаты качественной оценки риска возникновения неканцерогенных эффектов от загрязнения почв цинком на жилой территории (в формате представления данных в SADA)

Table 8. A qualitative assessment results of the non-carcinogenic hazard from soil contamination with zinc in a residential area (in the format of data presentation in SADA)

Name	Conc	Ingestion		Inhalation	Dermal	Vegetables	Milk		Beef	Total
		Hazard (Adult)	Hazard (Child)	Hazard (Adult)	Hazard (Adult)	Hazard (Adult)	Hazard (Adult)	Hazard (Child)	Hazard (Adult)	Hazard (Adult)
Zinc	1657,2	No	No	–	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

При максимальном обнаруженном уровне содержания цинка в почве 1657,2 мг/кг величина коэффициента опасности для жилых территорий составила $9,6 \cdot 10^{-3}$. Пространственное распределение уровней опасности при использовании территории в качестве жилой показано на рис. 4.

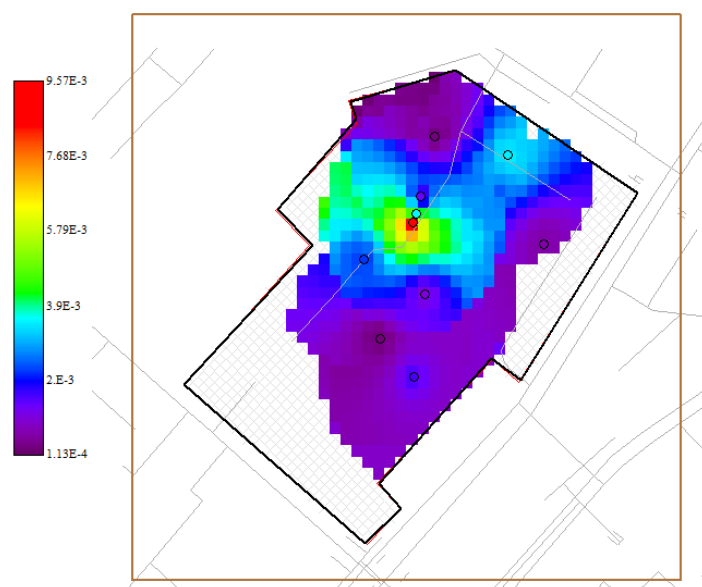


Рис. 4. Картограмма опасности возникновения неканцерогенных эффектов для жилой территории от загрязнения почв цинком на территории модельного объекта

Fig. 4. A map of the non-carcinogenic hazard from soil contamination with zinc on the territory of a model object for a residential area

Риски, связанные с содержанием в почвах цинка, расцениваются как незначительные даже при концентрациях в несколько тысяч мг/кг.

Заключение. Анализ разработанных к настоящему времени моделей для оценки рисков для здоровья человека и окружающей среды показал, что их практическое применение ограничивается назначением, техническими и программными требованиями. Для предварительной оценки рисков и уровней очистки загрязненных территорий при изменении их функционального назначения может использоваться модель SADA.

Полученные при помощи SADA количественные и качественные характеристики рисков от загрязнения почв предоставляют дополнительные возможности для оценки состояния территории, принятия решений о возможности смены ее функционального назначения и первоочередных мерах по улучшению экологической ситуации. Продемонстрированные оценки рисков для реальной постпромышленной территории указывают на их незначимые уровни для населения, проживающего на таких территориях. Таким образом, на рассмотренной территории возможна смена функционального назначения без принятия дополнительных мер.

Результаты расчетов могут быть полезны при планировании застройки городских территорий, оценке возможностей смены их функционального назначения, планировании мероприятий по очистке или перекрытию, что особо актуально для таких интенсивно застраиваемых городов, как Минск.

Список использованных источников

1. Rodríguez-Eugenio, N. Soil Pollution: a hidden reality / N. Rodríguez-Eugenio, M. McLaughlin, D. Pennock. – Rome : FAO, 2018. – 142 p.
2. FAO and UNEP. Global Assessment of Soil Pollution: Report. Rome, 2021. – <https://doi.org/10.4060/cb4894en>
3. Эколого-геохимические исследования постпромышленных площадок г. Минска / Т. И. Кухарчик [и др.] // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 320–330.
4. Городская среда: геоэкологические аспекты / В. С. Хомич [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 301 с.
5. Козыренко, М. И. Загрязнение почв при производстве лакокрасочных материалов / М. И. Козыренко, Т. И. Кухарчик // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Гидрокриология. – 2015. – № 3. – С. 230–238.
6. Хомич, В. С. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси / В. С. Хомич, С. В. Какарека, Т. И. Кухарчик. – Минск : Минсктиппроект, 2004. – 260 с.
7. Инструкция 2.1.7.11-12-5-2004 Гигиеническая оценка почвы населенных мест, 2004.
8. ЭкоНП 17.03.01-001-2020 Охрана окружающей среды и природопользование. Земли (в том числе почвы). Нормативы качества окружающей среды. Дифференцированные нормативы содержания химических веществ в почвах, 2020.
9. Carlon, C. Derivation methods of soil screening values in Europe / C. Carlon, M. D'Alessandro, F. Swartjes // A review and evaluation of national procedures towards harmonization. European Commission, Joint Research Centre. – Ispra, EUR 22805-EN, 2007. – 306 p.
10. Towards consistency in Risk assessment tools for contaminated sites management in the EU. The HERACLES strategy from the end of 2009 onwards. – Netherlands, 2009. – 29 p.
11. Model Procedures for the Management of Land Contamination. Contaminated Land Report 11 [Electronic resource]. – 2014. – Mode of access: www.environmentagency.gov.uk/http://www.claire.co.uk/index.php?option=comcontent&view=article&id=187&catid=45&Itemid=256. – Date of access: 14.11.2019.
12. Guideline on Investigation Levels for Soil and Groundwater, Australia [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.google.by/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cad=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKewjyp8yKxqfYAhViG5oKHepVDJEQFggmMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.nepc.gov.au%2Fsystem%2Ffiles%2Fresources%2F93ae0e77-e697-e494-656f-afaaf9fb4277%2Ffiles%2Fschedule-b1-guideline-investigation-levels-soil-and-groundwater-sep10.pdf&usg=AOvVaw3gVmoo7JAKNOA9FO5fXnjK>. – Date of access: 12.09.2019.
13. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду : Р 2.1.10.1920-04. – Минздрав России, 2004. – 143 с.
14. A Revision of Current Models for Environmental and Human Health Impact and Risk Assessment for Application to Emerging Chemicals / J. Rovira [et al.] // Global Risk-Based Management of Chemical Additives II : Risk-Based Assessment and Management Strategies, Chapter : A Revision of Current Models for Environmental and Human Health Impact and Risk Assessment for Application to Emerging Chemicals, Editors: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2013. – P. 91–108. – doi:10.1007/698_2012_171
15. Кухарчик, Т. И. Научно-методические подходы к оценке экологического риска в связи с загрязнением почв ПХБ и опыт применения в Беларуси / Т. И. Кухарчик, М. И. Козыренко // Природопользование. – 2011. – Вып. 19. – С. 8–16.
16. Ecological Risks from Contamination of Ukrainian Soils by Persistent Organic Pollutants / L. Moklyachuk [et al.] // Environment and Ecology Research. – 2014. – № 2 (1). – P. 27–34. – doi:10.13189/eer.2014.020105
17. Loranger, S. Health Risk Assessment of an Industrial Site Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using CalTOX, an Environmental Fate / Exposure Model / S. Loranger, Y. Courchesne // SAR QSAR Environ Res. – 1997. – № 6 (1–2). – P. 81–104. – doi:10.1080/10629369708031726

18. Davis, B. K. Risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in indoor air [Electronic resource] / B. K. Davis. – Mode of access: <https://dtsc.ca.gov/wp-content/uploads/sites/31/2018/01/Risk-Assess-PCB-Indoor-Air.pdf>. – Date of access: 15.06.2019.
19. USEtox® 2.0 Documentation / P. Fantke [et al.] // USEtox® International Center hosted at the Technical University of Denmark. – 2018. – 208 p.
20. MMSOILS [Electronic resource] / Environmental Modeling Community of Practice. – 1997. – Mode of access: <https://www.epa.gov/ceam/mmsoils>. – Date of access: 14.11.2020.
21. 3MRA [Electronic resource] / Environmental Modeling Community of Practice. – 2003. – Mode of access: <https://www.epa.gov/ceam/3mra>. – Date of access: 17.11.2020.
22. The European Union System for the Evaluation of Substances [Electronic resource] / European Commission. – Mode of access: <https://ec.europa.eu/jrc/en/scientific-tool/european-union-system-evaluation-substances>. – Date of access: 17.12.2021.
23. Updated technical background to the CLEA model. Using science to create a better place. Science report SC0050021/SR3 // Environment Agency, 2009. – 164 p.
24. Spatial Analysis and Decision Assistance (SADA). Version 4. User Guide. – 2005. – 320 p.
25. Stewart, R. N. An environmental decision support system for spatial assessment and selective remediation / R. N. Stewart, S. T. Purucker // Environmental Modelling and Software. – 2011. – № 26. – P. 751–760.

References

1. Rodríguez-Eugenio N., McLaughlin M., Pennock D. Soil Pollution: a hidden reality. Rome, FAO, 2018, 142 p.
2. FAO and UNEP. Global Assessment of Soil Pollution: Report. Rome, 2021. <https://doi.org/10.4060/cb4894en>
3. Kukharchyk T. I., Kakareka S. V., Kazyrenka M. I., Chernyuk V. D., Krylovich A. V. *Ekologo-geohimicheskie issledovaniya postpromyshlennykh ploshchadok g. Minska* [Ecogeochemical studies of the former industrial sites (on the example of Minsk)] // *Izvestiya NAN Belarusi. Seriya himicheskikh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 320–330 (in Russian)
4. Khomich V. S., Kakareka S. V., Kukharchyk T. I., Krauchuk L. A., Struk M. I., Kadackaya O. V., Bykova N. K., Haradzieckiy D. Yu., Zhyunach S. H., Kazyrenka M. I., Kamarouskiy M. E., Krukowskaya O. Yu., Kurman P. V., Aucharova A. P., Ryzhikau U. A., Sauchanka S. V., Sanets A. V. *Gorodskaya sreda: geoekologicheskie aspekty* [Urban environment: geoecological aspects]. Minsk, 2012, 426 p. (in Russian)
5. Kazyrenka M. I., Kukharchyk T. I. *Zagryaznenie pochvy pri proizvodstve lakokrasochnykh materialov* [Soil pollution by paint and varnish production]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Gidrokriologiya = Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Hydrocology*, 2015, no. 3, pp. 230–238 (in Russian)
6. Khomich V. S., Kakareka S. V., Kukharchyk T. I. *Ekogeochemiya gorodskikh landshtaftov Belarusi* [Ecogeochemistry of urban landscapes of Belarus]. Minsk, 2004, 260 p. (in Russian)
7. *Instrukciya 2.1.7.11-12-5-2004 Gigienicheskaya ocenka pochvy naselennykh mest* [Instruction 2.1.7.11-12-5-2004 Hygienic assessment of soil in urban areas]. 2004 (in Russian)
8. *EkoNiP 17.03.01-001-2020 Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Zemli (v tom chisle pochvy). Normativy kachestva okruzhayushchej sredy. Differencirovannyye normativy soderzhaniya himicheskikh veshchestv v pochvakh* [Environmental norms and rules 17.03.01-001-2020 Environmental protection and nature management. Land (including soil). Environmental quality standards. Differentiated standards for the content of chemicals in soils]. 2020 (in Russian)
9. Carlon C., D'Alessandro M., Swartjes F. Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization. European Commission, Joint Research Centre. Ispra, EUR 22805-EN, 2007, 306 p.
10. Towards consistency in Risk assessment tools for contaminated sites management in the EU. The HERACLES strategy from the end of 2009 onwards. Netherlands, 2009, 29 p.
11. Model Procedures for the Management of Land Contamination. Contaminated Land Report 11, 2014. Available at: http://www.environmentagency.gov.uk/http://www.claire.co.uk/index.php?option=com_content&view=article&id=45&Itemid=256 (accessed 14 November 2019).
12. Guideline on Investigation Levels for Soil and Groundwater, Australia. Available at: <https://www.google.by/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjyp8yKxqfYAhViG5oKHepVDJEQFggmMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.nepc.gov.au%2Fsystem%2Ffiles%2Fresources%2F93ae0e77-e697-e494-656f-afaaf9fb4277%2Ffiles%2Fschedule-b1-guideline-investigation-levels-soil-and-groundwater-sep10.pdf&usg=AOvVaw3gVmo07JAKNOA9FO5fXnjK> (accessed 12 September 2019).
13. P 2.1.10.1920-04 *Rukovodstvo po ocenke riska dlya zdorov'ya naseleniya pri vozdeystvii himicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchih okruzhayushchuyu sredu* [P 2.1.10.1920-04 Guidelines for assessing public health risk from exposure to chemicals that pollute the environment]. Ministry of Health of Russia, 2004, 143 p. (in Russian)
14. Rovira J., Nadal M., Domingo J. L., Tanaku T., Suciú N. A., Trevisan M., Capri E., Seguí X., Darbra R. M., Schuhmacher M. A Revision of Current Models for Environmental and Human Health Impact and Risk Assessment for Application to Emerging Chemicals. *Global Risk-Based Management of Chemical Additives II: Risk-Based Assessment and Management Strategies*. Editors: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, pp. 91–108. doi:10.1007/698_2012_171

15. Kukharchyk T. I., Kazyrenka M. I. *Nauchno-metodicheskie podhody k ocenke ekologicheskogo riska v svyazi s zagryazneniem pochv PHB i opyt primeneniya v Belarusi* [Scientific-methodological approaches to ecological risk assessment in relation to pcb soil contamination and application experience in Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2011, no. 19, pp. 8–16 (in Russian)
16. Moklyachuk L., Drebot O., Moklyachuk O., Moklyachuk T., Monarh V. Ecological Risks from Contamination of Ukrainian Soils by Persistent Organic Pollutants. *Environment and Ecology Research*, 2014, no. 2(1), pp. 27–34. doi:10.13189/eer.2014.020105
17. Loranger S., Courchesne Y. Health Risk Assessment of an Industrial Site Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using CalTOX, an Environmental Fate/Exposure Model. *SAR QSAR Environ Res*, 1997, no. 6(1–2), pp. 81–104. doi:10.1080/10629369708031726
18. Davis B. K. Risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in indoor air. Available at: <https://dtsc.ca.gov/wp-content/uploads/sites/31/2018/01/Risk-Assess-PCB-Indoor-Air.pdf> (accessed 15 June 2019).
19. Fantke P., Bijster M., Guignard C., Hauschild M., Huijbregts M., Joliet O., Kounina A., Magaud V., Margni M., McKone T. E., Posthuma L., Rosenbaum R.K., van de Meent D., van Zelm R. USEtox® 2.0 Documentation. USEtox® International Center hosted at the Technical University of Denmark, 2018, 208 p.
20. MMSOILS. Environmental Modeling Community of Practice, 1997. Available at: <https://www.epa.gov/ceam/mmssoils> (accessed 14 November 2020).
21. 3MRA. Environmental Modeling Community of Practice, 2003. Available at: <https://www.epa.gov/ceam/3mra> (accessed 17 November 2020).
22. The European Union System for the Evaluation of Substances. European Commission. Available at: <https://ec.europa.eu/jrc/en/scientific-tool/european-union-system-evaluation-substances> (accessed 17 December 2021).
23. Updated technical background to the CLEA model. Using science to create a better place. Science report SC0050021/SR3 // Environment Agency, 2009, 164 p.
24. Spatial Analysis and Decision Assistance (SADA). Version 4. User Guide, 2005, 320 p.
25. Stewart R. N., Purucker S. T. An environmental decision support system for spatial assessment and selective remediation. *Environmental Modelling and Software*, 2011, no. 26, pp. 751–760.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-36-44>
УДК 551.588(476)

Поступила в редакцию 20.04.2022
Received 20.04.2022

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ НА ДИНАМИКУ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В МИНСКОЙ И МОГИЛЁВСКОЙ ОБЛАСТЯХ

В. В. Коляда

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Получены количественные оценки влияния климатических трендов на динамику урожайности для Минской и Могилёвской областей за период 1990–2020 гг., используя статистические данные по зерновым культурам и данные по средней температуре воздуха и количеству атмосферных осадков. Показано, что несмотря на статистически значимый фактический рост урожайности озимых и яровых зерновых культур в последние десятилетия, большинство из них характеризовалось климатообусловленным снижением своей урожайности. При этом максимальное снижение было отмечено у ранних яровых зерновых культуры в Минской области: яровой пшеницы – 30–39 %, ярового ячменя – 55–62, овса – 48–72 % от фактического прироста. В Могилёвской области это снижение было ниже: яровая пшеница – 17–30 %, яровой ячмень – 22–33, овес – 35–36 %. Основными его причинами являлись чувствительность (высокие коэффициенты регрессии) данных культур к температурам периода вегетации, прежде всего июня при значительных абсолютных приростах этих температурных показателей в рассматриваемый период. Климатообусловленный прирост урожайности выявлен только в Минской области: у озимой пшеницы – до 10 % и озимой тритикале – 9–32 %. Он обусловлен высокой чувствительностью культур к температурам августа и сентября (период сева) и высокими приростами данных температурных показателей, которые с избытком компенсировали отрицательное влияние температур мая и июня. В Могилёвской области влияние температур периода сева для озимой пшеницы и озимой тритикале было статистически незначимым, а у озимой ржи – не столь существенным. Причины различий объясняются почвенными и климатическими особенностями исследуемых регионов Беларуси.

Ключевые слова: урожайность сельскохозяйственных культур; средняя температура воздуха; атмосферные осадки; множественная линейная регрессия; линейный тренд; Минская область; Могилёвская область.

Для цитирования. Коляда В. В. Влияние климатических трендов на динамику урожайности зерновых культур в Минской и Могилёвской областях // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 36–44.

INFLUENCE OF CLIMATE TRENDS ON DYNAMICS YIELD OF GRAIN CROPS IN MINSK AND MOGILEV REGIONS

V. V. Kalyada

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

Abstract. Quantitative estimates of the impact of climate trends on the yield dynamics for the Minsk and Mogilev regions for the period 1990–2020 are obtained using statistical data on grain crops and data on average air temperature and precipitation. It is shown that despite the statistically significant actual increase in the yield of winter and spring crops in recent decades, most of them were characterized by a climate-induced decrease in their yield. At the same time, the maximum decrease was noted in early spring crops in Minsk region: spring wheat – 30–39 %, spring barley – 55–62, oats – 48–72 % of the actual increase. In Mogilev region, this decrease was lower: spring wheat – 17–30 %, spring barley – 22–33 %, oats – 35–36 %. Its main reasons were the sensitivity (high regression coefficients) of these crops to the temperatures of the growing season, primarily June, with significant absolute increase in these temperature indicators in the period under consideration. The climate-conditioned increase in yield was revealed only in Minsk region: in winter wheat – up to 10% and winter triticale – 9–32 %. It is due to the high sensitivity of crops to the temperatures in August and September (the sowing period) and high increase in these temperature indicators, which more than compensated for the negative impact in May and June temperatures. In Mogilev region, the influence of the temperatures of the sowing period for winter wheat and winter triticale was statistically insignificant, and for winter rye it was not so significant. The reasons for the differences are explained by the soil and climatic features of the studied regions of Belarus.

Keywords: crop yield; mean air temperature; precipitation; multiple linear regression; linear trend; Minsk region; Mogilev region.

For citation. Kalyada V. V. Influence of climate trends on dynamics yield of grain crops in Minsk and Mogilev regions. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 36–44.

Введение. Несмотря на заметный рост урожайности сельскохозяйственных культур в Беларуси в последние десятилетия, обусловленный внедрением новых высокоурожайных сортов и совершенствованием технологий их возделывания, в их динамике сохраняет свое значение влияние погодно-климатических факторов, интерес к оценке которых в условиях современных глобальных изменений климата лишь возрастает. При проведении подобных оценок широко применяются регрессионные модели, основным условием построения которых является наличие кондиционных данных по урожайности и погодным условиям [1–3]. Несмотря на то что их использование имеет уже более чем вековую историю, они остаются основным инструментом для оценки влияния погодно-климатических факторов на урожайность сельскохозяйственных культур на уровне целых стран и регионов, включая Республику Беларусь [4–7]. Однако анализ показывает, что при проведении подобных оценок по сути ограничиваются оценками чувствительности различных культур к воздействию конкретных факторов. При этом в стороне остается вопрос о влиянии современных изменений климата на динамику урожайности, об их роли в формировании его величины. Вместе с тем актуальность подобных количественных оценок представляется несомненной как для диагностики факторов, определяющих современную динамику урожайности сельскохозяйственных культур, так и для прогноза ее уровней в будущем.

Методология подобной оценки была продемонстрирована применительно к динамике урожайности пшеницы в Австралии в 1952–1992 гг. [8]. Широкую известность данный подход приобрел в рамках глобальной оценки влияния климатических трендов на урожайность шести важнейших продовольственных культур мира: пшеницы, кукурузы, риса, сои, ячменя и сорго [9]. В дальнейшем многочисленные оценки климатообусловленной урожайности зерновых культур по данной методике с использованием панельных данных по административным областям за период активной фазы изменений климата были получены по территории России [10, 11]. Данная методология также была использована нами при оценках роли климатических трендов в динамике урожайности зерновых и зернобобовых культур и озимого рапса на территории Беларуси за период 1990–2012 гг. [12].

Цель работы – оценить влияние изменения климата на урожайность зерновых культур за период 1990–2020 гг. на примере центрального и восточного регионов Беларуси – Минской и Могилёвской областей.

Материалы и методы исследования. Для оценки были использованы данные Национального статистического комитета Республики Беларусь для административных областей за 1990–2020 гг., по посевным площадям и валовым сборам основных зерновых культур в сельскохозяйственных организациях, имеющих сплошное распространение на территории нашей страны, на основании которых была рассчитана их урожайность с 1 гектара посевной площади. Для характеристики условий тепло- и влагообеспеченности и их развития были привлечены ежемесячные данные Белгидромета по средней температуре воздуха и количеству атмосферных осадков для действующих метеостанций, осредненные в границах соответствующих административных областей. Для озимых зерновых культур (пшеница, тритикале, рожь) использовали данные за август предыдущего года – август текущего года; для ранних яровых зерновых культур (пшеница, ячмень, овес) – за март – август текущего года. На основе этой информации для каждой из рассмотренных культур были сформированы выборки эмпирических данных в виде временных рядов.

Оценка включала три этапа.

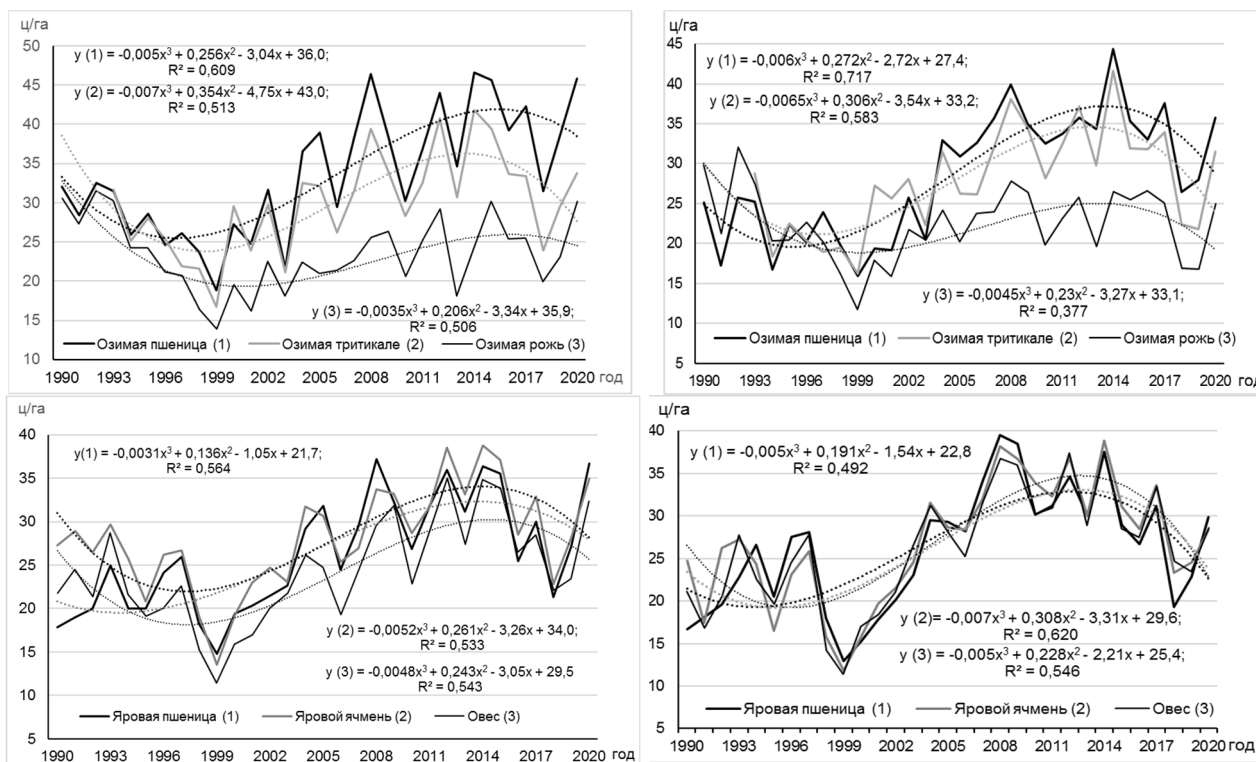
1. Расчет коэффициентов множественной регрессии урожайности сельскохозяйственных культур от температуры воздуха и атмосферных осадков в первых разностях статистически значимых на уровне ошибки не более 10 % по методу наименьших квадратов (МНК). Регрессионные зависимости тестировали на правильность спецификации модели (тест Рамсея), нормальность распределения (по χ^2) и гетероскедастичность (тесты Вайта и Бройша – Пагана), автокорреляцию (тест Бройша – Годфри) регрессионных остатков, мультиколлинеарность факторов (метод инфляционных факторов). Результаты регрессии помимо значимых коэффициентов переменных включали скорректированный на количество регрессоров коэффициент детерминации (R_{adj}^2), величина которого характеризует качество подгонки модели к эмпирическим данным.

2. Оценка коэффициентов линейных трендов для временных рядов урожайности сельскохозяйственных культур и климатических переменных в их исходных значениях по МНК и расчет фактических приростов всех показателей как разность конечных и начальных значений, установленных по линейным трендам.

3. Вычисление по результатам регрессионного анализа климатообусловленного прироста/снижения урожайности. Данный прирост/снижение урожайности представляет собой алгебраическую сумму произведений коэффициентов множественной регрессии всех значимых для данной культуры климатических переменных на их линейные приросты за рассматриваемый период.

Для оценки параметров регрессионных моделей и верификации полученных зависимостей был использован эконометрический пакет GRET [13]. Для интерпретации полученных результатов привлекались данные Научно-прикладного справочника по агроклиматическим ресурсам Беларуси, в котором обобщены данные по условиям произрастания сельскохозяйственных культур и проведения полевых работ за период 1989–2018 гг. [14].

Результаты и их обсуждение. Анализируемый период охватывает целиком постсоветский период, для которого характерно резкое снижение урожайности зерновых культур во всех регионах Беларуси, включая Минскую и Могилёвскую области, в 1990-е годы, заметный ее рост в 2000-е годы и в начале 2010-х годов, а также стабилизация и даже снижение уровней урожайности в самом конце данного периода. Подобный характер динамики урожайности характерен для всех рассматриваемых культур и может быть аппроксимирован полиномом третьей степени (см. рисунок).



Динамика урожайности зерновых культур в Минской (слева) и Могилёвской (справа) областях на фоне их полиномиальных трендов

Dynamics of grain crop yields in Minsk (left) and Mogilev (right) regions against the background of their polynomial trends

При этом ряды средних температур воздуха и в меньшей степени количества атмосферных осадков, как будет показано ниже, содержат линейные тренды. В этих условиях универсальным подходом для корректной оценки зависимости урожайности от климатических факторов является исключение существующих трендов во всех анализируемых показателях за счет перехода к их первым разностям [10].

Оценки коэффициентов регрессии для климатических факторов урожайности озимых зерновых культур в первых разностях представлены в табл. 1, из которой следует, что озимые зерновые культуры в Минской области характеризуются сходным набором климатических факторов, ответственных за колебания их урожайности. Повышенные температуры в августе и сентябре благоприятно сказывались на их урожайности, тогда как увеличение осадков в сентябре снижало урожайность пшеницы и тритикале, а их рост в октябре отрицательно сказывался на урожайности ржи. Это, очевидно, связано с тем, что сев озимых культур начинается здесь в конце августа, основной его период приходится на сентябрь, а наиболее поздние посевы случаются в октябре. Поэтому теплая без лишних осадков погода способствует своевременному проведению посевной компании, появлению всходов и кущению злаков. Атмосферные осадки в ноябре, в период прекращения осенней вегетации, а также в январе, в период зи-

мовки, способствуют росту урожайности озимой пшеницы и озимой тритикале. Повышенные температуры в марте в период возобновления вегетации благоприятны для урожайности озимой пшеницы и озимой тритикале, тогда как их повышение в апреле лимитирует урожайность озимой ржи. Повышенный температурный фон в мае и июне, т. е. в период колошения и цветения, весьма негативно сказывается на урожайности всех без исключения озимых зерновых культур. На урожайность озимой пшеницы и озимой тритикале отрицательное влияние также оказывают избыточные атмосферные осадки в июле – в период созревания злаков (см. табл. 1).

В Могилёвской области в период сева и осеннего развития озимых культур положительное влияние на урожайность температуры в сентябре и отрицательное влияние атмосферных осадков в октябре проявляются лишь для озимой ржи. Ноябрьские осадки благоприятны для урожайности озимой пшеницы и озимой тритикале, тогда как декабрьские осадки негативно сказываются на формировании урожая всех озимых зерновых культур. Повышенные температуры в феврале и марте, т. е. в период завершения зимовки и возобновления вегетации, благотворно сказываются на урожайности озимой пшеницы и озимой тритикале как менее морозостойких культур. Отрицательное влияние высоких температур на урожайность всех озимых зерновых культур области проявляется в июне, в период колошения и начала созревания. Для озимой ржи негативное влияние температуры проявляется здесь уже в апреле и мае. Негативное влияние атмосферных осадков в области в весенне-летний период обнаруживается только у пшеницы в период стеблевания и колошения – в мае, а также в период созревания – в июле (см. табл. 1).

Таблица 1. Регрессионные оценки климатических факторов урожайности озимых культур за 1990–2020 гг. для Минской (1) и Могилёвской (2) областей

Table 1. Regression estimates of climatic factors in the winter crop yield for 1990–2020 for Minsk (1) and Mogilev (2) regions

Переменная	Озимая пшеница		Озимая тритикале		Озимая рожь	
	1	2	1	2	1	2
Коэффициенты регрессии для средней температуры, $^{\circ}\text{C}$						
Август п. г.	1,58***	–	1,63***	–	0,70***	–
Сентябрь п. г.	1,42***	–	1,59***	–	1,56***	1,52***
Январь	0,45***	–	–	–	0,32***	–
Февраль	–	0,45***	–	0,37***	0,18**	–
Март	0,37***	0,53***	0,37***	0,62***	–	–
Апрель	–	–	–	–	–0,78***	–0,59**
Май	–1,14***	–	–0,77***	–	–0,53***	–0,75***
Июнь	–1,64***	–1,17***	–1,74***	–1,69***	–1,68***	–1,62***
Июль	–	–	–	–	–	–
Коэффициенты регрессии для сумм осадков, $\text{ц/га} / 10 \text{ мм}$						
Сентябрь п. г.	–0,49***	–	–0,56***	–	–	–
Октябрь п. г.	–	–	–	–	–0,32***	–0,19**
Ноябрь п. г.	1,01***	0,42***	0,66***	0,28**	–	–
Декабрь п. г.	–	–0,65**	–	–0,72*	–	–0,99***
Январь	1,01***	–	1,02***	–	–	–
Май	–	–0,39**	–	–	–	–
Июль	–0,36***	–0,16***	–0,28***	–	–	–
R^2_{adj}	0,864	0,692	0,872	0,714	0,785	0,686

В таблицах 1–5 статистическая значимость тренда представлена на уровне: * 10 %; ** 5 %; *** 1 %.

Примечания: п. г. – предыдущий год; по озимой тритикале данные приведены за 1993–2020 гг.

Результаты регрессии урожайности для ранних яровых культур от климатических факторов в первых разностях с отображением статистически значимых переменных приведены в табл. 2.

Сев ранних яровых зерновых культур на территории Минской и Могилёвской областей в основном приходится на апрель и лишь в отдельные годы – на конец марта [14]. Поэтому положительные коэффициенты регрессии для температуры в марте здесь указывают прежде всего на благоприятные для повышения урожайности ранние сроки сева этих культур. Повышенное количество осадков в марте отодвигает эти сроки, что в итоге отрицательно сказывается на величине урожайности овса в Минской области и ячменя – в Могилёвской области. Негативное влияние температур в Могилёвской области отмечается уже в апреле – в период сева и появления всходов у ячменя и овса, а в Минской области – только в мае – в период кущения всех озимых зерновых культур. Все без исключения ранние яровые зерновые культуры обеих областей испытывают негативное влияние повышенных температур в июне – во время ключевой для формирования урожайности стадий их развития –

колошения (выметывания метелки у овса) и цветения. Для яровой пшеницы в обеих областях и ярового ячменя в Минской области негативное влияние повышенных температур проявляется и в июле – в период созревания злаков. Майские осадки, напротив, способствуют росту урожайности яровой пшеницы в Минской и Могилёвской областях, а июньские осадки снижают ее в Могилёвской области. Отрицательные коэффициенты регрессии осадков в августе для яровой пшеницы и овса указывают на особую чувствительность этих культур в Минской области к дождливым условиям в период их уборки (см. табл. 2).

Таблица 2. Регрессионные оценки климатических факторов урожайности ранних яровых зерновых культур за 1990–2020 гг. для Минской (1) и Могилёвской (2) областей

Table 2. Regression estimates of climatic factors in the spring crop yield for 1990–2020 for Minsk (1) and Mogilev (2) regions

Переменная	Яровая пшеница		Яровой ячмень		Овес	
	1	2	1	2	1	2
Коэффициенты регрессии для средней температуры, ц/га/ °C						
Март	0,25**	0,58***	0,16**	0,73***	0,25***	0,51***
Апрель	–	–0,58**	–	–0,53**	–	–0,66**
Май	–0,69**	–	–0,62**	–	–0,67**	–
Июнь	–1,14***	–1,51***	–1,61***	–1,70***	–1,47***	–1,88***
Июль	–0,92***	–0,65***	–0,67**	–	–	–
Август	–	–	–	–	–1,02*	–
Коэффициенты регрессии для сумм осадков, ц/га/ 10 мм						
Март	–	0,51**	–	0,79**	–0,63**	–
Апрель	0,45**	–0,52***	–	–0,38***	0,39*	–
Май	0,48**	0,76***	–	–	–	–
Июль	–	–0,22***	–	–	–	–
Август	–0,22**	–	–	–	–0,32***	–
R^2_{adj}	0,539	0,730	0,598	0,715	0,686	0,694

Изменение условий теплообеспеченности и влагообеспеченности сельскохозяйственных культур в рассматриваемый период оценивалось по линейным трендам среднемесячных температур воздуха и количества атмосферных осадков (табл. 3, 4).

Таблица 3. Изменение средней температуры воздуха на территории Минской (1) и Могилёвской (2) областей за период 1990–2020 гг.

Table 3. Change in air temperature in the territory Minsk (1) and Mogilev (2) regions for the periods 1990–2020

Месяц	Коэффициент регрессии, °C/10 лет		Температура по тренду, °C				Прирост/Снижение, °C	
			1990 г.		2020 г.			
	1	2	1	2	1	2	1	2
Август п. г.	0,69***	0,69***	16,6	16,5	18,7	18,6	2,1	2,1
Сентябрь п. г.	0,77***	0,75***	11,2	11,0	13,5	13,3	2,3	2,2
Октябрь п. г.	0,22	0,28	6,2	5,8	6,9	6,6	0,7	0,8
Ноябрь п. г.	1,16**	1,21**	−0,4	−1,1	3,1	2,5	3,5	3,6
Декабрь п. г.	1,19**	1,30**	−4,4	−5,3	−0,8	−1,4	3,6	3,9
Январь	−0,60	−0,62	−3,3	−3,9	−5,0	−5,8	−1,8	−1,8
Февраль	0,10	0,18	−3,6	−4,6	−3,3	−4,0	0,3	0,6
Март	0,39	0,38	0,1	−0,4	1,2	0,7	1,2	1,2
Апрель	0,32	0,24	7,0	7,1	8,0	7,8	1,0	0,7
Май	0,61*	0,74**	12,3	12,2	14,1	14,4	1,8	2,2
Июнь	0,90***	0,82***	15,3	15,6	18,0	18,1	2,7	2,4
Июль	0,43	0,40	17,9	18,1	19,2	19,3	1,3	1,2
Август	0,61**	0,64***	16,8	16,7	18,6	18,6	1,8	1,9

Оценки линейных трендов для средней температуры воздуха во все месяцы сельскохозяйственного года показали, что теплообеспеченность территории Минской и Могилёвской областей в период 1990–2020 гг. преимущественно росла. Исключением является январь, когда она незначимо снижалась. Статистически значимые температурные тренды наблюдались в мае и июне, августе

и сентябре, ноябре и декабре. При этом наиболее высокую значимость (вероятность ошибки менее 1 %) имели тренды температуры воздуха в июне, августе и сентябре, а максимальные абсолютные приросты температур за рассматриваемый период отмечались в ноябре и декабре. Различия в величинах трендов между областями является несущественной, хотя среди статистически значимых переменных более высокими коэффициентами и приростами характеризуется восточный регион страны – Могилёвская область. Результатом потепления стало сокращение в рассматриваемых регионах периода с отрицательными температурами исключительно зимними месяцами за счет потепления в ноябре, а в Могилёвской области – и в марте (см. табл. 3).

В течение рассматриваемого периода в целом за календарный год количество осадков в Минской области возросло на 44 мм, или на 7,0 %, а в Могилёвской области – на 32 мм, или 5,2 %. Однако этот рост в обеих областях в основном был статистически незначимым и различен по знаку. В Минской области статистически значимые тренды отсутствуют, а в Могилёвской области помимо указанного месяца они представлены осадками декабря, января и сентября на уровне ошибки не более 5 %. В течение месяцев года преобладали положительные тренды атмосферных осадков. Отрицательными трендами в Минской области характеризовались сентябрь, февраль, март, апрель и июнь, а в Могилёвской области – только сентябрь, октябрь и апрель. Максимальные абсолютные и относительные приросты атмосферных осадков за рассматриваемый период в Минской области имели место в августе (30 мм и 56 %), а в Могилёвской области абсолютный прирост был максимальным в мае (20 мм), а относительный прирост – в январе (57 %). Максимальное абсолютное и относительное снижение количества выпадающих осадков в обеих областях наблюдалось в сентябре и составляло 21 мм, или 32 %, в Минской области и 32 мм, или 46 %, в Могилёвской области (см. табл. 4).

Таблица 4. Изменение количества атмосферных осадков на территории Минской (1) и Могилёвской (2) областей за период 1990–2020 гг.

Table 4. Change in the amount of precipitation in the territory Minsk (1) and Mogilev (2) regions for the periods 1990–2020

Месяц	Коэффициент регрессии, мм /10 лет		Сумма осадков по тренду, мм				Прирост/Снижение			
			1990 г.		2020 г.		мм		%	
	1	2	1	2	1	2	1	1	2	2
Август п. г.	7,4	1,2	59	60	81	64	22	38	3	6
Сентябрь п. г.	-7,1	-10,6**	66	69	44	37	-21	-32	-32	-46
Октябрь п. г.	2,8	-4,1	51	64	59	52	8	17	-12	-19
Ноябрь п. г.	2,8	2,5	42	42	51	49	9	20	7	18
Декабрь п. г.	2,8	5,5*	41	33	49	50	8	21	17	50
Январь	2,8	5,8**	39	30	48	48	8	22	17	57
Февраль	-1,6	0,3	41	35	36	36	-5	-12	1	3
Март	-1,8	1,9	42	34	37	40	-5	-13	6	17
Апрель	-1,7	-3,8	41	44	36	33	-5	-12	-12	-26
Май	3,0	6,5	57	50	66	70	9	16	20	39
Июнь	-2,7	0,9	79	71	71	73	-8	-10	3	4
Июль	6,5	4,4	79	83	99	96	20	25	13	16
Август	10,0	1,2	53	60	83	64	30	56	4	6

Заключительным этапом оценки являлся расчет фактического и климатообусловленного прироста/снижения урожайности озимых и яровых зерновых культур, результаты которого представлены в табл. 5.

Оценки фактического прироста урожайности, рассчитанные по линейным трендам, показали, что в период 1990–2020 г. в обеих областях он был статистически значимым у подавляющего большинства рассматриваемых зерновых культур. Только урожайность озимой ржи в данный период не росла. При этом в Могилёвской области коэффициенты линейных трендов и приросты урожайности большинства зерновых культур были более высокими. В Минской области максимальными фактическими приростами урожайности среди зерновых культур характеризуются озимая и яровая пшеница, увеличившие свою урожайность за рассматриваемый период на 70 и 78 % соответственно. Урожайность овса выросла на 57 %, озимой тритикале – на 46, а ярового ячменя – на 43 %. В Могилёвской области максимальным приростом характеризовалась урожайность озимой пшеницы, увеличившаяся почти в 2 раза (на 93 %). Урожайность остальных культур возросла более чем в 1,5 раза: овса – на 65 %, ярового ячменя – на 62, яровой пшеницы – на 61, а озимой тритикале, статистическая информация для которой имеется, начиная с 1993 г., – на 56 % (см. табл. 5).

Таблица 5. Фактический и климатообусловленный прирост/снижение урожайности в Минской (1) и Могилёвской (2) областях за период 1990–2020 гг.**Table 5. Actual and climate-related increase/decrease in crop yields in the Minsk (1) and Mogilev (2) regions for the period 1990–2020**

Культура	Коэффициент регрессии, ц/га/год		Фактический прирост, ц/га		Климатообусловленный прирост/снижение, ц/га		В том числе с учетом значимых климатических трендов, ц/га	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Озимая пшеница	0,58***	0,60***	17,4	18,1	1,7	–3,8	0,0	–2,9
Озимая тритикале	0,40**	0,43**	10,7	11,6	3,4	–4,2	0,9	–4,1
Озимая рожь	0,01	0,0	0,3	0,0	–1,8	–4,1	–0,5	–5,7
Яровая пшеница	0,49***	0,41***	14,6	12,3	–5,7	–2,1	–4,3	–3,7
Яровой ячмень	0,33**	0,42**	9,9	12,6	–6,1	–2,8	–5,4	–4,2
Овес	0,36***	0,43***	10,7	12,8	–7,7	–4,5	–5,2	–4,6

Вместе с тем расчеты показали, что у большинства зерновых культур на территории обеих областей в рассмотренный период наблюдалось климатообусловленное снижение урожайности. В Минской области только у озимой пшеницы и озимой тритикале отмечаются приросты как при использовании в расчетах всех климатических факторов, влияющих на динамику их урожайности, так и при учете лишь тех факторов, которые содержат статистически значимые линейные тренды. В Могилёвской области все рассмотренные зерновые культуры независимо от варианта расчетов характеризуются климатообусловленным снижением своей урожайности (см. табл. 5).

Среди группы озимых зерновых культур в Минской области климатообусловленные приросты для озимой пшеницы составляли 1,7 ц/га, или 10 % от фактического прироста за период, озимой тритикале – 3,4 ц/га, или 32 %. Озимая рожь снизила свою урожайность под влиянием климата на 0,5–1,8 ц/га, которая в рассматриваемый период фактически отсутствовала. В Могилёвской области климат обусловил снижение урожайности всех озимых зерновых культур: пшеницы – на 2,8–3,9 ц/га (16–21 %), тритикале – на 4,2 (36), ржи – на 4,1–5,7 ц/га при отсутствии фактического прироста (см. табл. 5).

Анализ показывает, что положительную роль климатических трендов для озимых пшеницы и тритикале на Минщине обеспечили, главным образом, высокие положительные значения коэффициентов регрессии температур августа и сентября (период их сева) в сочетании с высокими приростами этих температурных показателей за рассматриваемый период, которые компенсировали отрицательную роль температур мая и июня (периоды колошения и цветения), также характеризующихся значительными приростами своих величин. На Могилёвщине влияние температур в период сева для озимой пшеницы и тритикале было статистически незначимым, а для озимой ржи оказалось не столь значительным (см. табл. 1, 3–5).

В группе ранних яровых культур климатообусловленное снижение урожайности было повсеместным и более значительным. В Минской области у яровой пшеницы оно составило – 4,3–5,7 ц/га (30–39 % от фактического прироста), у ярового ячменя – 5,4–6,1 (55–62), у овса – 5,2–7,7 ц/га (48–72 %). В Могилёвской области климатообусловленное снижение урожайности оказалось заметно меньше в абсолютном и относительном выражении: у яровой пшеницы оно составило 2,1–3,7 ц/га (17–30 % фактического прироста), у ярового ячменя – 2,8–4,2 (22–33), у овса – 4,5–4,6 ц/га (35–36 %).

Некоторые различия здесь связаны с тем, что основными лимитирующими факторами у ранних яровых зерновых культур в Минской области выступали температуры мая и июня (периоды кущения и колошения), дополнительно усиленные негативным влиянием температуры июля (период созревания) у яровой пшеницы и ярового ячменя, в то время как в Могилёвской области влияние майской температуры как лимитирующего фактора не было обнаружено, а негативная роль июльской температуры ограничилась яровой пшеницей (табл. 2, 3–5). Причиной этому, очевидно, является более тяжелый механический состав пахотных почв Могилёвской области, обеспечивающий большие запасы продуктивной влаги в период вегетации данных культур.

Выводы.

1. Выполненная оценка обнаружила значительный, в основном негативный вклад современных климатических трендов в динамику урожайности на фоне ее фактического роста у озимых и ранних яровых зерновых культур Минской и Могилёвской областей. Исключением является озимая рожь, фактический рост которой в обеих областях отсутствовал.

2. Климатообусловленный прирост урожайности среди рассмотренных зерновых культур выявлен только в Минской области: у озимой пшеницы – до 10 % и озимой тритикале – 9–32 %. В Могилёвской области вызванное изменением климата снижение урожайности у озимой пшеницы составило 16–21 %

от фактического прироста за исследованный период, а у озимой тритикале – 36 %. Озимая рожь характеризовалась климатообусловленным снижением своей урожайности в обеих областях.

3. Максимальным снижением урожайности под влиянием изменений климата характеризовались ранние яровые зерновые культуры в Минской области: яровая пшеница – 30–39 %, яровой ячмень – 55–62, овес – 48–72 % от фактического прироста. В Могилёвской области это снижение было ниже: яровая пшеница – 17–30 %, яровой ячмень – 22–33, овес – 35–36 %.

4. Причины различий объясняются почвенно-климатическими особенностями исследуемых регионов Беларуси: большей континентальностью климата Могилёвской области, относительно более легким механическим составом и худшими водно-физическими свойствами пахотных почв Минской области.

5. Для более полной и точной оценки климатообусловленных изменений урожайности сельскохозяйственных культур в Беларуси необходимо выполнение расчетов для других регионов страны, а также проведение их на более детальном территориальном уровне, прежде всего, на уровне административных районов.

Список использованных источников

1. Thompson, L. M. Effects of Changes in Climate and Weather Variability on the Yields of Corn and Soybeans / L. M. Thompson // J. Prod. Agric. – 1988. – Vol. 1, no. 1. – P. 20–27.
2. Auffhammer, M. Empirical studies on agricultural impacts and adaptation / M. Auffhammer, W. Schlenker // Energy Economics. – 2014. – Vol. 46. – P. 555–561.
3. Blanc, E. Approaches to Assessing Climate Change Impacts on Agriculture: An Overview of the Debate / E. Blanc, J. Reilly // Review of Environmental Economics and Policy. – Summer 2017. – Vol. 11, iss. 2. – P. 1–12.
4. Кулаковская, Т. Н. Оценка влияния погодных условий на урожай зерновых культур в БССР / Т. Н. Кулаковская, И. М. Богдевич, Р. В. Шаталова // Почвоведение и агрохимия. – Минск, 1980. – Вып. 16. – С. 131–142.
5. Дмитренко, Ю. А. Климатическая обусловленность урожайности сельскохозяйственных культур Республики Беларусь / Ю. А. Дмитренко // Природные ресурсы. – 2004. – № 1. – С. 26–35.
6. Логинов, В. Ф. Оценка влияния климатических факторов на динамику урожайности основных сельскохозяйственных культур в Брестской области / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, Ан. А. Волчек // Природные ресурсы. – 2006. – № 3. – С. 5–22.
7. Камышенко, Г. А. Оценка влияния основных климатических факторов на урожайность озимых зерновых культур на территории Беларуси в прогнозных целях / Г. А. Камышенко // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 41–48.
8. Nicholls, N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends / N. Nicholls // Nature. – 1997. – Vol. 387. – P. 484–485.
9. Lobell, D. B. Global scale climate – crop yield relationships and the impacts of recent warming / D. B. Lobell, C. B. Field // Environ. Res. Lett. – 2007. – Vol. 2. – P. 1–7.
10. Сиротенко, О. Д. Новый подход к идентификации функционалов погоды – урожай для оценки последствий изменений климата / О. Д. Сиротенко, В. Н. Павлова // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 2. – С. 92–100.
11. Павлова, В. Н. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России / В. Н. Павлова, О. Д. Сиротенко // Труды ГГО. – 2012. – Вып. 565. – С. 132–151.
12. Коляда, В. В. Оценки влияния климатических трендов на динамику урожайности сельскохозяйственных культур / В. В. Коляда // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Брест, 2014. – Ч. III. – С. 134–139.
13. Малова, А. С. Основы эконометрики в среде GRETL / А. С. Малова. – М. : Проспект, 2016. – 112 с.
14. Научно-прикладной справочник по агроклиматическим ресурсам Республики Беларусь на основе современных изменений климата за 1989–2018 годы / под ред. И. С. Данилович, В. И. Мельника // Оценка влияния изменения климата на агроклиматические ресурсы территории Беларуси, разработка и реализация мероприятий по адаптации к изменению климата: заключительный отчет / договор с Минприроды № 56/3/1.10/2020, №115Б-2020 от 23.06.2020. – Минск, 2020. – 331 с.

References

1. Thompson L. M. Effects of Changes in Climate and Weather Variability on the Yields of Corn and Soybeans. *J. Prod. Agric.*, 1988, vol. 1, no. 1, pp. 20–27.
2. Auffhammer M., Schlenker W. Empirical studies on agricultural impacts and adaptation. *Energy Economics*, 2014, vol. 46, pp. 555–561.
3. Blanc E., Reilly J. Approaches to Assessing Climate Change Impacts on Agriculture: An Overview of the Debate. *Review of Environmental Economics and Policy*, Summer 2017, vol. 11, iss. 2, pp. 1–12.
4. Kulakovskaya T. N., Bogdevich I. M., Shatalova R. V. *Ocenka vliyaniya pogodnykh uslovij na urozhaj zernovykh kul'tur v BSSR* [Assessment of the influence of weather conditions on the yield of grain crops in the Belarusian SSR] *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*. Minsk, 1980, iss. 16, pp. 131–142. (in Russian)

5. Dmitrenkova Yu. A. *Klimaticheskaya obuslovlennost' ukrozhajnosti sel'skohozyajstvennykh kul'tur Respubliki Belarus'* [Climatic conditionality of crop yields in the Republic of Belarus]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2004, no. 1, pp. 26–35. (in Russian)
6. Loginov V. F., Volchek A. A., Volchek An. A. *Ocenka vliyaniya klimaticheskikh faktorov na dinamiku urozhajnosti osnovnykh sel'skohozyajstvennykh kul'tur v Brestskoy oblasti* [Assessment of the influence of climatic factors on the dynamics of productivity of the main agricultural crops in the Brest region]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2006, no. 3, pp. 5–22. (in Russian)
7. Kamysheva G. A. *Ocenka vliyaniya osnovnykh klimaticheskikh faktorov na urozhajnost' ozimyykh zernovykh kul'tur na territorii Belarusi v prognoznnykh celyakh* [Assessment of the influence of the main climatic factors on the yield of winter grain crops in Belarus for forecasting purposes]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 41–48. (in Russian)
8. Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature*, 1997, vol. 387, pp. 484–485.
9. Lobell D. B., Field C. B. Global scale climate – crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environ. Res. Lett.*, 2007, vol. 2, pp. 1–7.
10. Sirotenko O. D., Pavlova V. N. *Novyy podhod k identifikatsii funktsionalov pogoda – urozhay dlya ocenki posledstviy izmeneniy klimata* [A new approach to identification of weather-crop functional for estimation of climate change consequences]. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and hydrology*, 2010, no. 2, pp. 92–100. (in Russian)
11. Pavlova V. N., Sirotenko O. D. *Nablyudaemye izmeneniya klimata i dinamika produktivnosti sel'skogo hozyajstva Rossii* [Observed climate changes and dynamics of Russian agricultural productivity]. *Trudy GGO imeni A. I. Vojeykova* [Proc. of Voeikov Main Geoph. Observatory], 2012, iss. 565, pp. 132–151. (in Russian)
12. Kalyada V. V. *Ocenki vliyaniya klimaticheskikh trendov na dinamiku urozhajnosti sel'skohozyajstvennykh kul'tur* [Evaluations of the impact of climate trends on the dynamics of crop yield]. *Aktual'n. nauchno-tekhn. i ekolog. problemy sohraneniya sredy obitaniya: sb. nauchn. statej Mezhd. nauchn.-praktich. konf.* [Actual scientific and technical and ecologist. habitat conservation issues: Proc. Int. Conf.], Brest, 2014, ch. III, pp. 134–139. (in Russian)
13. Malova A. S. *Osnovy ekonometriki v srede GRETL* [Fundamentals of Econometrics in the GRETL Environment]. Moscow, 2016, 112 p. (in Russian)
14. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po agroklimaticheskim resursam Respubliki Belarus' na osnove sovremennykh izmeneniy klimata za 1989–2018 gody* [Scientific and applied reference book on agro-climatic resources of the Republic of Belarus based on the assessment of modern climate change for 1989–2018], ed. I. S. Danilovich and V. I. Melnik. *Ocenka vliyaniya izmeneniya klimata na agroklimaticheskie resursy territorii Belarusi, razrabotka i realizatsiya meropriyatij po adaptatsii k izmeneniyu klimata: zaklyuchitelnyy otchet. Dogovor s Minprirody № 56/3/1.10/2020, № 115B-2020 ot 23.06.2020* [Assessment of the impact of climate change on the agro-climatic resources of the territory of Belarus, development and implementation of measures to adapt to climate change: concluding report. Agreement with the Ministry of Natural Resources no. 56/3/1.10/2020, no. 115B-2020 dated 06/23/2020]. Minsk, 2020, 331 p. (in Russian)

Информация об авторе

Валерий Васильевич Коляда – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь).
E-mail: valery_v_kalyada@tut.by

Information about the author

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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-45-55>
УДК 550.4:631.45

Поступила в редакцию 25.04.2022
Received 25.04.2022

ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ ПРИ АЭРОТЕХНОГЕННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ СВИНЕЦСОДЕРЖАЩЕЙ ПЫЛЬЮ

Н. В. Михальчук, П. В. Качанович, А. Н. Ажгиревич, М. М. Дашкевич

Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси, Брест, Беларусь

Аннотация. Представлены данные о радиальной миграции элементов-загрязнителей в почвах ельника кисличного, березняка черноольхово-снытевого и черноольшаника болотнопапоротниково-крапивного, подвергшихся аэропылевому загрязнению свинецсодержащими отходами. Отходы хранились насыпью на открытой площадке в течение 2015–2018 гг. и затем были перемещены на спецполигон захоронения. Пробы почв и лесных подстилок отбирали слоями по 2 см. На исследуемой территории представлены сильно- и среднекислые, не насыщенные, средне- и малогумусные, хорошо дренируемые лесные почвы. Для оценки миграционной активности ТМ использовали коэффициент концентрации (или аномальности) элемента и коэффициент радиальной контрастности.

В вертикальном измерении наиболее высокие уровни загрязнения характерны для подстилок. Интенсивность накопления элементов в них определяется двумя факторами: развитостью самих подстилок и удаленностью пробной площадки от источника эмиссий. В исследуемой локации в отношении наиболее опасных элементов-загрязнителей (особенно свинца и кадмия) хорошо развитые подстилки ельников выступают биогеохимическим барьером, существенно снижающим опасность загрязнения гумусового горизонта почв и поступление металлов в более глубокие слои почвы, а также в грунтовые воды. При этом миграционная подвижность железа, никеля и, отчасти, меди сохраняется. Слаборазвитые подстилки березняков и черноольшаников обладают менее выраженными протекторными свойствами.

Ключевые слова: тяжелые металлы; загрязнение почвы; производство свинцово-кислотных автомобильных аккумуляторов; радиальная миграция в почвах; лесная подстилка.

Для цитирования. Михальчук Н. В., Качанович П. В., Ажгиревич А. Н., Дашкевич М. М. Особенности вертикальной миграции тяжёлых металлов в почвах различных типов лесных биогеоценозов при аэротехногенном загрязнении свинецсодержащей пылью // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 45–55.

FEATURES OF VERTICAL MIGRATION OF HEAVY METALS IN SOILS OF VARIOUS TYPES OF FOREST BIOGEOCENOSIS DURING AEROTECHNOGENIC CONTAMINATION WITH LEAD-CONTAINING DUST

M. V. Mikhalchuk, P. V. Kachanovich, A. N. Ashgirevich, M. M. Dashkevich

Polesie Agrarian Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Brest, Belarus

Abstract. We obtained data on radial migration of pollutant elements in soils of spruce, birch and black alder forests that had been subjected to air-dust contamination with lead-containing wastes. This waste was stored in a waste dump during 2015–2018 and then the waste was moved to a special landfill. We sampled each layer of soil and forest litter at intervals of 2 cm. The study area has strongly and moderately acidic, non-saturated, medium and low-humus, well-drained forest soils. We used the element concentration (or anomaly) coefficient and the radial contrast coefficient to assess the TM migration activity.

The highest levels of contamination are characteristic of forest litter. The intensity of element accumulation in litter is determined by two factors: the size of the litter itself and the distance of the sample site from the emission source. Well developed spruce litter is a biogeochemical barrier, which significantly reduces the risk of pollution of the humus horizon of soils with cadmium and lead, as well as the flow of metals into deeper soil layers and groundwater. At the same time, the migration mobility of iron, nickel and, to some extent, copper remains. The poorly size litter of birch and black-alder forests has less pronounced protective properties.

Keywords: heavy metals; soil pollution; lead-acid car battery production; radial migration in soils; forest floor.

For citation. Mikhalchuk M. V., Kachanovich P. V., Ashgirevich A. N., Dashkevich M. M. Features of vertical migration of heavy metals in soils of various types of forest biogeocenosis during aerotechnogenic contamination with lead-containing dust. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 45–55.

Введение. Химическое загрязнение почвенного покрова является актуальной экологической проблемой современности [1]. Эколого-геохимическая ситуация на территории Брестской области в целом является весьма благоприятной. Однако отмечаются случаи локального загрязнения почв, в том числе и тяжелыми металлами (ТМ). Характерный пример – химическое загрязнение на территории поселка Зеленый Бор Ивацевичского района Брестской области в ареале несанкционированного складирования золы свинцовой (ориентировочно около 10 тыс. т). Процесс разгрузки, трехлетнего хранения и погрузки при вывозе золы свинцовой (2018 г.) сопровождался пылением разной степени интенсивности, что привело к существенному загрязнению ТМ почвогрунтов как самой площадки размещения отходов, так и прилегающей лесопокрытой территории.

Накопление ТМ в лесных экосистемах имеет специфический характер: здесь имеется резерв элементов как в живой фитомассе, так и в органическом веществе лесной подстилки. При этом концентрация ТМ в лесных подстилках фоновых, незагрязненных территорий выше, чем в живых растениях [2]. Биоаккумуляция ТМ в лесных ландшафтах выступает в качестве одного из регуляторов геохимических циклических процессов [3–5].

В настоящее время накоплен обширный материал о поступлении поллютантов в окружающую среду при аэротехногенном ее загрязнении выбросами предприятий металлургической отрасли [6–8]. Установлены уровни содержания ТМ в подстилках [9–13], в том числе под действием различных источников загрязнения. Однако значительно меньше изучена проблема аэропылевого загрязнения окружающей среды в случаях, когда источником эмиссии служат поверхности свалок отходов, отвалов, хвостохранилищ. В некоторых исследованиях были установлены факторы, определяющие латеральную миграцию поллютантов [14], однако вопросы радиальной миграции ТМ по почвенному профилю в лесных экосистемах в зонах сильного аэропылевого загрязнения изучены недостаточно.

Выявление специфики радиального распределения ТМ в почвах различных типов биогеоценозов, особенно в условиях значительного аэротехногенного загрязнения, позволит определить структурные и функциональные особенности различных типов почв в обеспечении устойчивости к загрязнениям и самоочищающей способности экосистем.

Цель работы – определить специфику радиальной миграции элементов-загрязнителей в почвах различных типов лесных биогеоценозов, подвергшихся аэропылевому загрязнению свинецсодержащими отходами в ареале площадки их складирования.

Материалы и методы исследования. Исследуемая территория расположена в Ивацевичском районе Брестской области в 8,5 км к юго-западу от г. Ивацевичи, в 0,6 км к северо-востоку от поселка Зеленый Бор и в 2,2 км к юго-востоку от железнодорожной станции Нехачево.

Как следует из метеорологических наблюдений, в теплый период года в локации доминируют воздушные потоки северо-западного и западного направлений. Открытая территория промплощадки способствует сносу пылевых частиц с поверхности складированных отходов западными, юго-западными и северо-западными ветрами, в меньшей степени – северными, восточными и южными, что и послужило основным фактором формирования пространственного рисунка ореолов загрязнения лесного массива с вектором направления в сторону востока и юго-востока.

По результатам электронно-зондового химического анализа проб золы свинцовой (усредненный по площади снимка при увеличении в 100 раз) выявлено высокое (4,09 %) содержание основного элемента загрязнителя – свинца.

Исследование фракций золы свинцовой с размерами частиц в диапазоне 0,1–600 мкм показало, что фракция частиц размером 5–10 мкм составляла 11,66 %, 10–20 мкм – 40,83, 20–50 мкм – 43,41 % от общего объема; доля остальных фракций была незначительной.

Количественно доминирующие в обеих пробах фракции с размером частиц 10–50 мкм вполне способны под воздействием движения приземных воздушных масс переноситься на значительные, до нескольких километров, расстояния [15], однако экранирующее действие густого древостоя в локации ограничило распространение пылевого загрязнения до расстояния оценочно 250–300 м от края промплощадки в восточном, юго-восточном и южном направлениях. Самые крупные фракции частиц, размером свыше 100 мкм, вероятно, осели в полосе лесного массива шириной не более 10–15 м.

Полевые исследования и отбор проб почв для последующего лабораторного анализа проводили в 2019 г. по ГОСТ 17.4.4.02-2017. Для выявления особенностей вертикальной миграции элементов пробы отбирали из разреза послойно с шагом опробования 2 см. При изучении почв фоновых территорий исследовали генетические горизонты. В качестве фоновых рассматривали дерново-подзолистые песчаные и супесчаные почвы территории, удаленной на 1,5–2,0 км к северу от промплощадки (выделы 23, 27, 34 кв. 194 Ивацевичского лесничества).

Экспериментальные исследования почв на содержание ТМ проводили в аккредитованной лаборатории Полесского аграрно-экологического института НАН Беларуси на атомно-абсорбционном спектрометре SOLAAR MkII M6 Double Beam AAS в соответствии с [16, 17].

Оценку степени загрязнения почв осуществляли методом сравнения с ПДК/ОДК, а также с фоновыми показателями.

Оценку уровня загрязнения почвенного покрова ТМ проводили по общепринятым показателям. Коэффициент концентрации (или аномальности) (K_c) элемента определяли отношением его фактического содержания в точке опробования к содержанию в аналогичной природной среде на фоновом участке:

$$K_c = C_i / C_{\phi}, \quad (1)$$

где C_i – содержание химического элемента в точке опробования; C_{ϕ} – среднее содержание элемента на фоновом участке.

При расчетах данного коэффициента использовали следующие значения концентрации ТМ в дерново-подзолистых почвах юго-запада Беларуси (субрегиональный фон), мг/кг: Pb – 5,59; Cd – 0,05; Cu – 1,27; Zn – 7,39; Mn – 107,32; Ni – 0,60; Co – 0,26; Cr – 1,88. Согласно [18], при значении K_c от 5 до 10 загрязнение считалось слабым, от 10,1 до 30 – умеренным, при значении более 30 – сильным.

Информативным показателем особенностей распределения элементов в профиле почв является коэффициент радиальной контрастности (K_k), который определяли по формуле

$$K_k = Z / Z_1, \quad (2)$$

где Z – содержание элемента в генетическом горизонте почвы; Z_1 – средневзвешенное содержание элемента в исследуемой совокупности почвенных горизонтов (слоев) данного профиля [19].

Результаты исследований и их обсуждение. Проведено сравнительное изучение радиального распределения ТМ в трех типах биогеоценозов:

- березняке черноольхово-снытевом с участием осины (далее – березняк), формула древостоя 7Б(б)2Ол(ч)ЕЯ;
- ельнике кисличном (далее – ельник), формула древостоя 7Е2Ол(ч)Б(б);
- черноольшанике болотнопапоротниково-крапивном (далее – черноольшаник), формула древостоя 9Ол(ч)1Б(п).

При этом пробные площадки (ПП) в границах двух первых биогеоценозов были расположены на одинаковом удалении от источника загрязнения – в 35 м, а ПП в черноольшанике – в 70 м (см. рисунок).



Схема размещения пробной площадки и локализация источника аэропылевого полиэлементного загрязнения лесного массива тяжелыми металлами:

- 1 – березняк черноольхово-снытевый; 2 – ельник кисличный;
3 – черноольшаник болотнопапоротниково-крапивный; 4 – зона складирования отходов

Scheme of placement of test site and localization of the source of airborne dust polyelement pollution of the forest area with heavy metals:

- 1 – moan birch forest; 2 – sour spruce forest; 3 – swamp-fern-nettle black alder; 4 – waste storage area

Почва под березняком относится к дерново-подзолистым супесчаным глееватым почвам со слабо развитой фрагментированной подстилкой, которая имеет слабокислую реакцию (pH_{KCl} 5,82) (табл. 1). Реакция среды минеральных горизонтов постепенно снижается от значений pH_{KCl} 4,42 в верхнем двухсантиметровом слое до pH_{KCl} 3,82 на глубине 12–15 см с последующим повышением до pH_{KCl} 5,25 (28–32 см) и pH_{KCl} 6,05 (32–40 см).

Почва под ельником – дерново-подзолистая супесчаная глеевая с поверхностно-торфянистым горизонтом. В исследуемой части ее профиля подстилка мощностью до 4 см четко дифференцирована – в ней выделяются подгоризонты: опад (L), ферментативный (F) и гумифицированный (H). Лежащий ниже торфянистый горизонт $A_1(t)$ (до 11 см) сменяется переходным торфянисто-гумусовым горизонтом $A_1(t)A_2$, который с глубины 18 см переходит в элювиальный подзолистый горизонт. Подстилка имеет среднекислую и кислую реакцию среды (pH_{KCl} 4,82–5,09). Нижерасположенные горизонты отличаются сильнокислой реакцией (pH_{KCl} 3,11–4,38). Плотность сложения верхнего горизонта невысока, что обусловлено его торфянистым характером, пронизанностью многочисленными корнями, обилием ходов мезофауны.

Почва в черноольшанике относится к торфянисто-глеевым супесчаным почвам со слабо развитой подстилкой, которая имеет среднекислую реакцию (pH_{KCl} 4,86). Вниз по профилю до глубины около 12 см реакция почвенной среды уменьшается и сменяется на сильнокислую – pH_{KCl} 4,12–4,46; ниже в горизонтах A_{t2} , B_{1g} показатель pH_{KCl} неуклонно возрастает и с глубины 20 см находится в интервале, характерном для кислых почв (pH_{KCl} 5,01–5,50), а в горизонте B_2C (с 26 см) – для слабокислых почв (pH_{KCl} 5,81).

Установлено, что в вертикальном измерении наиболее высокие уровни загрязнения характерны для подстилок (табл. 1). Интенсивность накопления элементов в них определяется двумя факторами: развитостью самих подстилок и удаленностью ПП от источника эмиссий. Так, подстилки ельников в сравниваемом ряду характеризуются максимальной мощностью (2 см и более).

Наибольшее содержание свинца зафиксировано в слое F подстилок ельников, которое составляет 731,37 мг/кг, или около 23 ПДК (32,0 мг/кг). Нижерасположенный слой H также отличается высоким уровнем свинцового загрязнения – 286,5 мг/кг (9 ПДК).

Протекторные свойства слабо развитой подстилки березняков выражены в гораздо меньшей степени. При сопоставимом уровне ее загрязнения (263,04 мг/кг) и нижнего слоя подстилки ельников (286,5 мг/кг) содержание свинца в верхнем слое собственно почвы березняков (84,22 мг/кг) в 1,5 раза выше, чем в аналогичном слое почвы ельников. При этом K_d в данном слое почвы березняков достигает 1,9 – максимального показателя для самого верхнего слоя собственно почвы трех сравниваемых биогеоценозов.

Столь же слабыми сорбционно-защитными свойствами обладает подстилка черноольшаников. Абсолютные значения содержания в ней свинца (133,0 мг/кг) в 2 раза ниже, чем в березняках (263,04 мг/кг), однако и расположена ПП в черноольшанике на удалении в 2 раза большем в сравнении с ельниками и березняками. В то же время K_d в поверхностном слое собственно почвы черноольшаников достигает 1,6, что в 2,7 раза больше, чем в ельниках. При этом в слоях собственно почвы (2–8 см) K_d составляет 0,7–0,5, хотя в аналогичных слоях почвы березняков – 0,4–0,2; ельников – 0,2–0,1. Следовательно, можно сделать предварительный вывод о том, что в верхнем органо-минеральном горизонте почв процессы радиальной миграции свинца наиболее интенсивно протекают в почве черноольшаников.

Как и для свинца, для кадмия характерны очень высокие значения K_d в подстилках, особенно ельников и березняков. Так, K_d в подгоризонте F подстилки ельников достигает 77,0, уменьшаясь в 2,3 раза к нижнему слою H до величины 34,0. Абсолютные значения содержания элемента составляют 3,85 и 1,70 мг/кг соответственно. Очень резко, практически в 4,0 раза, содержание кадмия падает к следующему слою опробования – собственно почве, где его уровень составляет 0,43 мг/кг. Схожее (в 3,5 раза) уменьшение содержания элемента в переходном слое подстилка – почва наблюдается в березняках (с 1,76 до 0,51 мг/кг). И хотя концентрации кадмия в 8,6 и 10,2 раза соответственно все еще превышают фоновое содержание элемента, следует признать, что хорошо развитая подстилка является довольно надежным биогеохимическим барьером на пути нисходящей миграции данного металла.

Среди исследуемых ТМ 1-го класса опасности по интенсивности загрязнения почвенного покрова рассматриваемой локации на втором после свинца месте находится цинк. В обоих слоях подстилок ельников его содержание превышает уровень ПДК (55 мг/кг), достигая в верхнем слое 1,5 ПДК (83,69 мг/кг), а в слабо развитых подстилках березняков и черноольшаников – около 0,8 ПДК (45,04 мг/кг и 42,84 мг/кг соответственно). Вместе с тем во всех трех типах биогеоценозов слои подстилок в отношении цинка обладают гораздо менее выраженными барьерными функциями, чем для свинца. Так, содержание цинка в самом верхнем слое собственно почвы ельников уменьшается в сравнении с нижним слоем подстилки в 1,7 раза, березняков – в 2,0, черноольшаников – лишь в 1,4 раза (напомним, что для свинца оно составляет 4,9, 3,1 и 3,7 раза соответственно).

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в почвах березняков, ельников, черноольшаников геохимической аномалии «Зеленый Бор», 2019 г.

Table 1. The content of heavy metals in the soils of birch forests, spruce forests, black alder forests of the Zeleny Bor geochemical anomaly, 2019

Биогео- ценоз	Горизонт	Глубина, см	Валовое содержание, мг/кг									pH _{KCl}
			Pb	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni	Co	Cr	
Березняк	Опад L	–	148,76	1,30	8,62	118,07	609,84	1626	1,46	1,05	1,47	6,00
	A ₀ (F)	–	263,04	1,76	12,63	45,04	285,59	6575	3,17	2,07	2,42	5,82
	A ₁₋₁	0–2	84,22	0,51	6,57	22,45	150,09	6190	3,31	2,15	1,72	4,42
	A ₁₋₂	2–4	17,53	<0,40	3,47	9,11	35,01	3624	2,55	<1,7	1,15	4,19
	A ₁₋₃	4–6	12,20	<0,40	2,38	6,09	14,50	2226	1,98	<1,7	1,18	3,96
	A ₁₋₄	6–8	10,67	<0,40	1,96	6,08	19,82	2107	2,02	<1,7	1,31	3,84
	A ₁₋₅	8–11	8,36	<0,40	1,74	6,02	32,51	2003	1,94	<1,7	<1,00	3,82
	A ₁₋₆	11–14	5,43	<0,40	1,25	4,73	33,63	1793	1,73	<1,7	<1,00	3,93
	A ₁₋₇	14–17	2,77	<0,40	0,96	3,73	31,72	1534	<1,3	<1,7	<1,00	4,09
A ₁ B ₁₋₁	17–20	<2,0	<0,40	<0,75	3,06	25,61	1548	1,53	<1,7	<1,00	–	
Ельник	Опад L	–	71,37	0,81	9,03	74,81	383,58	524	1,30	1,05	1,03	5,48
	A ₀ (F)	–	731,37	3,85	30,12	83,69	450,48	9372	4,77	2,19	<1,00	4,82
	A ₀ (H)	–	286,50	1,70	18,92	55,47	418,44	11 853	6,20	4,25	3,22	5,09
	A ₁₋₁	0–2	58,24	0,43	11,03	32,93	224,74	11 079	7,81	4,28	5,09	4,38
	A ₁₋₂	2–4	25,27	<0,40	8,75	20,88	116,51	9977	6,55	3,39	4,29	4,06
	A ₁₋₃	4–6	19,42	<0,40	5,53	6,88	30,76	4466	3,67	<1,7	2,27	3,42
	A ₁₋₄	6–8	13,11	<0,40	4,45	2,13	8,97	2169	2,60	<1,7	2,29	3,34
	A ₁ (T) ₁₋₁	8–10	9,50	<0,40	3,51	1,15	5,81	1209	<1,3	<1,7	1,86	3,18
	A ₁ (T) ₁₋₂	10–12	8,84	<0,40	3,44	0,85	3,87	964	<1,3	<1,7	<1,00	3,11
	A ₁ (T) ₁₋₃	12–14	5,51	<0,40	2,13	0,70	3,04	826	<1,3	<1,7	<1,00	3,15
	A ₁ (T) ₁₋₄	14–16	5,21	<0,40	2,08	0,98	3,09	879	<1,3	<1,7	<1,00	3,17
	A ₁ B ₁₋₁	18–20	4,38	<0,40	2,05	1,27	3,76	960	<1,3	<1,7	<1,00	3,31

Окончание табл. 1
Ending of table 1

Биогео- ценоз	Горизонт	Глубина, см	Валовое содержание, мг/кг									pH _{KCl}
			Pb	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni	Co	Cr	
Черноольшаник	Опад L	–	43,12	0,33	14,06	83,00	369,52	891	1,53	0,58	1,66	5,43
	A ₀ (F)	–	133,00	0,80	19,46	42,84	149,61	6831	5,49	2,42	5,04	4,86
	A ₁ T ₁	0–2	35,91	<0,40	14,82	29,80	105,14	4980	4,69	1,90	3,65	4,55
	A ₁ T ₂	2–4	15,98	<0,40	13,81	24,44	77,65	5858	5,25	2,40	3,97	4,40
	A ₁ T ₃	4–6	13,48	<0,40	13,41	19,61	53,04	5097	5,42	1,99	3,98	4,12
	A ₁ T ₄	6–8	11,18	<0,40	13,36	14,42	35,64	5214	5,32	1,98	4,67	4,35
	A ₁ T ₅	8–10	6,66	<0,40	12,29	9,40	24,70	4682	5,16	<1,7	4,54	4,39
	A ₁ T ₆	10–12	4,77	<0,40	11,29	7,81	21,40	5419	5,63	<1,7	5,24	4,46
	A ₁ T ₇	12–14	3,14	<0,40	7,46	6,58	17,48	4624	5,02	<1,7	4,02	4,61
	A ₁ T ₈	14–16	2,86	<0,40	5,03	6,80	18,28	4345	5,18	1,74	3,74	4,74
	A ₂ T ₁	16–18	<2,0	<0,40	3,72	5,21	14,61	3359	3,46	<1,7	2,23	4,97
	A ₂ T ₂	18–20	<2,0	<0,40	2,48	3,88	11,90	2435	2,43	<1,7	1,08	5,10
	A ₂ T	20–22	<2,0	<0,40	1,28	2,14	7,14	1170	<1,3	<1,7	<1,00	5,23

П р и м е ч а н и е. При средневзвешенном содержании свинца в почве под ельником 106,12 мг/кг для слоя F подстилок K_к равен 6,9 – максимальному из установленных показателей. К слою H он снижается в 2,6 раза и составляет 2,7 единиц (табл. 2). Столь высокая сорбционная емкость слоев подстилок ельников существенно снижает интенсивность нисходящей миграции свинца; в результате в поверхностном двухсантиметровом слое собственно почвы его содержание достигает 58,24 мг/кг, что в 4,9 раза меньше, чем в расположенной выше подстилке. И хотя этот уровень все еще в 1,8 раза превышает значение ПДК, K_к элемента существенно ниже единицы – 0,6.

О более интенсивном нисходящем перемещении цинка свидетельствуют и значения K_k : их переход через единицу фиксируется, как правило, на глубине в 2 раза большей, чем у свинца (табл. 2). В то же время концентрации цинка, сопоставимые с фоновым его содержанием (7,39 мг/кг), в профиле почв березняков и ельников наблюдаются на глубине около 5 см, тогда как для свинца (5,59 мг/кг) – на глубине 11 см в березняках и 13 см в ельнике. Подобная ситуация отражает чрезвычайно высокий уровень свинцового загрязнения почв в непосредственной близости от площадки складирования отходов. Несмотря на высокую способность органического вещества подстилок и гумусового горизонта почв к связыванию свинца, неоднократно отмечаемую в литературных источниках [20–22], буферная устойчивость почв к свинцовому загрязнению имеет свой предел, при достижении которого не исключается поступление свинца в нижележащие почвенные горизонты. Данное обстоятельство обуславливает необходимость осуществления специальных мероприятий, направленных на снижение миграционной активности опасных поллютантов (их пассивацию), а также проведения долговременного мониторинга геохимической ситуации в зоне наиболее сильного загрязнения.

Таблица 2. Внутрипрофильное распределение значений коэффициентов контрастности (1) и аномальности (2) в почвах березняков, ельников и черноольшаников

Table 2. Intra-profile distribution of values of contrast ratios (1) and anomaly (2) in soils of birch, spruce and black alder forests

Горизонт	Глубина, см	Pb		Cd		Cu		Zn		Ni		Fe
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Березняк												
A ₀ (F)	–	5,8	47,1	2,0	35,2	3,6	9,9	3,8	6,1	1,7	5,3	2,1
A ₁₋₁	0–2	1,9	15,1	0,6	10,2	1,7	5,2	1,9	3,0	1,7	5,5	2,0
A ₁₋₂	2–4	0,4	3,1	0,4	6,0	1,0	2,7	0,8	1,2	1,3	4,3	1,2
A ₁₋₃	4–6	0,3	2,2	–	–	0,7	1,9	0,5	0,8	1,0	3,3	0,7
A ₁₋₄	6–8	0,2	1,9	–	–	0,6	1,5	0,5	0,8	1,1	3,4	0,7
A ₁₋₅	8–11	0,2	1,5	–	–	0,5	1,4	0,5	0,8	1,0	3,2	0,7
A ₁₋₆	11–14	0,1	1,0	–	–	0,4	1,0	0,4	0,6	0,9	2,9	0,6
A ₁₋₇	14–17	0,1	0,5	–	–	0,3	0,8	0,3	0,5	0,7	–	0,5
A _{1B1-1}	17–20	0,04	–	–	–	0,2	–	0,3	0,4	–	2,5	0,5
Ельник												
A ₀ (F)	–	6,9	130,8	2,4	77,0	3,6	23,7	4,5	11,3	1,0	8,0	1,9
A ₀ (H)	–	2,7	51,3	1,1	34,0	2,3	14,9	3,0	7,5	1,3	10,3	2,4
A ₁₋₁	0–2	0,6	10,4	0,3	8,6	1,3	8,7	1,6	4,5	1,7	13,0	2,3
A ₁₋₂	2–4	0,2	4,5	0,3	–	1,1	6,9	1,1	2,8	1,4	10,9	2,0
A ₁₋₃	4–6	0,2	3,5	–	–	0,7	4,4	0,4	0,9	0,8	6,1	0,9
A ₁₋₄	6–8	0,1	2,4	–	–	0,5	3,5	0,1	0,3	0,6	4,3	0,4
A _{1(T)1-1}	8–10	0,1	1,7	–	–	0,4	2,8	0,1	0,2	0,3	–	0,3
A _{1(T)1-2}	10–12	0,1	1,6	–	–	0,4	2,7	0,05	0,1	–	–	0,2
A _{1(T)1-3}	12–14	0,1	1,0	–	–	0,3	1,7	0,04	0,1	–	–	0,2
A _{1(T)1-4}	14–16	0,1	0,9	–	–	0,3	1,6	0,05	0,1	–	–	0,2
A _{1B1-1}	18–20	0,04	0,8	–	–	0,2	1,6	0,1	0,2	–	–	0,2
Черноольшаник												
A ₀ (F)	–	5,8	23,8	1,3	16,0	1,7	15,3	2,6	5,8	1,1	9,2	1,4
A _{1T1}	0–2	1,6	6,4	0,7	–	1,3	11,7	1,8	4,0	0,9	7,8	1,0
A _{1T2}	2–4	0,7	2,9	–	–	1,2	10,9	1,5	3,3	1,0	8,8	1,2
A _{1T3}	4–6	0,6	2,4	–	–	1,2	10,6	1,2	2,7	1,1	9,0	1,0
A _{1T4}	6–8	0,5	2,0	–	–	1,2	10,5	0,9	2,0	1,0	8,9	1,0
A _{1T5}	8–10	0,3	1,2	–	–	1,1	9,7	0,6	1,3	1,0	8,6	0,9
A _{1T6}	10–12	0,2	0,9	–	–	1,0	8,9	0,5	1,1	1,1	9,4	1,1
A _{1T7}	12–14	0,1	0,6	–	–	0,7	5,9	0,4	0,9	1,0	8,4	0,9
A _{1T8}	14–16	0,1	0,5	–	–	0,4	4,0	0,4	0,9	1,0	8,6	0,9
A _{2T1}	16–18	0,1	–	–	–	0,3	2,9	0,3	0,7	0,7	5,8	0,7

Весьма схожие с цинком особенности внутрипрофильного распределения свойственны меди. Так, максимальное накопление меди, как и цинка, зафиксированное в слое F подстилки ельников, составило 30,12 мг/кг (0,9 ПДК). В нижерасположенном подгоризонте Н оно уменьшилось в 1,6 раза (у цинка – в 1,5 раза) – до 18,92 мг/кг. При переходе к горизонту A₁(T) почвы у обоих элементов наблюдалось 1,7-кратное падение концентрации (до 11,03 мг/кг против 18,92 мг/кг у меди и до 32,93 мг/кг

против 55,47 мг/кг у цинка). Однако следует отметить, что в пределах горизонта $A_1(t)$ интенсивность падения концентрации по слоям опробования почвы ельников у цинка была в среднем в 2 раза более высокой, чем у меди, и, как уже отмечалось, на глубине примерно 5 см абсолютные значения соответствовали фоновым показателям. Для меди приближение к фоновым величинам наблюдалось на глубине 14–18 см. Примерно такие же соотношения в снижении концентраций данных элементов при их нисходящем перемещении наблюдались в почвах березняков и черноольшаников: фоновый уровень для цинка в первом случае отмечался на глубине около 5 см, во втором случае – 10–12 см, для меди – 10–12 и 20–22 см соответственно. Приведенные данные свидетельствуют о более высокой внутрипрофильной миграционной активности меди в сравнении с цинком, что является следствием менее прочной фиксации элемента органическим веществом почв. Однако открытым остается вопрос о природе подобного распределения меди по профилю – вполне вероятно, что оно, прежде всего, отражает специфику почвообразовательных процессов и в меньшей степени обусловлено техногенной составляющей.

Если рассматривать относительные величины, отражаемые коэффициентами K_k и K_c , то для меди в почвах березняков и ельников их значения становятся ниже 1,0 на глубине 4 см собственно почвы (ситуация, аналогичная и для цинка). В черноольшаниках данный переход отмечается в слое 10–12 см (для цинка – на глубине в 2 раза меньшей: 4–6 см). При этом максимальные и схожие значения K_k для меди и цинка в первых двух биогеоценозах отмечались в слое подстилок (3,6 и 3,8 соответственно).

Как известно, железо в составе золы свинцовой занимает доминирующее положение, поэтому его поведение в профиле исследуемых почв является весьма информативным в плане отражения особенностей вертикальной миграции элементов.

В верхнем слое слабоминерализованных подстилок железо, в отличие от других рассматриваемых элементов, сохраняет свою подвижность, что приводит, к примеру, в березняках и ельниках к незначительному сокращению общего содержания металла в самом верхнем слое собственно почвы. Особенно наглядно это проявляется в ельниках. Так, в подгоризонте F подстилок, куда поступил основной объем пылевой массы, содержание железа оказалось в 0,8 раза меньшим, чем в нижерасположенном слое H (9372 мг/кг против 11853 мг/кг). В следующем двухсантиметровом слое собственно почвы концентрация элемента снизилась незначительно (до 11079 мг/кг, или в 1,1 раза). Аналогичное снижение в 1,1 раза отмечалось и в нижерасположенном слое опробования, и только с глубины 5–6 см интенсивность падения концентраций удвоилась. Схожая картина наблюдалась и в почве березняков. В то же время распределение железа в исследованной части профиля почв черноольшаников оказалось относительно равномерным до глубины 14–16 см. При максимальном содержании элемента в подстилке (6831 мг/кг) и 1,4-кратном его снижении к поверхности собственно почвы (до 4980 мг/кг) вниз по профилю в трех слоях опробования отмечались случаи повышения концентраций в сравнении с предыдущим слоем. По-видимому, такая ситуация отражает наложение техногенной составляющей на природный повышенный фон содержания железа в гидроморфных почвах черноольшаников. Этот вывод подтверждается и при анализе K_k . Так, его устойчивый переход к значениям ниже 1,0 отмечается лишь на глубине 16–18 см. В расположенных выше слоях опробования собственно почв его значение слабо варьирует и находится в интервале 0,9–1,2, т. е. наблюдается сглаживание нисходящего градиента загрязнения восходящим гидрогенным привносом элемента в торфянистые почвы черноольшаников. В почвах березняков и особенно ельников значения K_k резко уменьшаются на глубине 4–6 см, что отражает специфику распределения элемента в профиле почв зоны наиболее сильного загрязнения.

Столь же равномерным, как и у железа, оказалось внутрипрофильное распределение в почвах черноольшаников никеля. До глубины 14–16 см содержание элемента изменялось от 4,96 до 5,63 мг/кг, т. е. в довольно узком диапазоне значений. K_c также варьировал незначительно (от 7,8 до 9,4); еще менее существенными оказались отклонения от единицы значений K_k (0,9–1,1). Как и у железа, содержание никеля было более высоким в первом от поверхности слое собственно почв березняков и ельников в сравнении со слоем подстилок. При этом поведение никеля в слоях подстилки ельников оказалось тождественным железу: меньше в верхнем слое, чем в нижнем (4,77 мг/кг против 6,20 мг/кг) с повышением до 7,81 мг/кг (или в 1,3 раза) в верхнем слое горизонта A_{t1} . Все перечисленное свидетельствует о невысокой буферной емкости подстилок в отношении никеля и сохранении миграционной подвижности в них данного элемента, как и железа.

Обращает на себя внимание факт довольно высокого содержания исследуемых элементов в листовом опаде 2019 г., сформировавшемся и поступившем на слой собственно подстилки уже в период после устранения источника загрязнения. Максимальное загрязнение опада наблюдалось в березняках, расположенных в непосредственной близости от площадки хранения золы свинцовой. Так, содержание свинца достигало здесь 148,76 мг/кг, цинка – 118,07, кадмия – 1,30 мг/кг. Расположенные на таком же удалении ельники имели более чистый опад: концентрации в нем перечисленных элементов составляли 71,37, 74,81 и 0,81 мг/кг соответственно, или в 1,6–2,1 раза меньше. Это объясняется, по-

видимому, двумя факторами: более выраженной экранирующей способностью опушечного пояса ельников в сравнении аналогичным поясом березняков и поступлением значительной части опада ельников с более высоких и менее загрязненных ярусов деревьев. Опад черноольшаников оказался наименее загрязненным; сказался фактор большей (в 2,0 раза) удаленности от промплощадки и хорошей экранированности поясом ельников. Загрязненность опада после вывоза золы свинцовой объясняется смывом поллютантов с поверхности веток, коры, валежника; она может происходить и от верхнего слоя подстилок, на поверхность которого поступает свежий опад. В дальнейшем следует ожидать существенное уменьшение загрязнения опада.

Таким образом, установлено, что в исследуемой локации в отношении наиболее опасных элементов-загрязнителей (особенно свинца и кадмия) хорошо развитые подстилки ельников выступают биогеохимическим барьером, существенно снижающим опасность загрязнения гумусового горизонта почв и поступление металлов в более глубокие слои почвы, а также в грунтовые воды. Так, при среднем взвешенном содержании свинца в почве под ельником 106,12 мг/кг для слоя F подстилок K_k равен 6,9. К слою H он снижается в 2,6 раза и составляет 2,7 единиц. В результате в поверхностном двухсантиметровом слое собственно почвы его содержание составляет 58,24 мг/кг, или в 4,9 раза меньше, чем в расположенной выше подстилке. Вместе с тем в подстилках сохраняется миграционная подвижность железа и никеля, отчасти – меди. Слаборазвитые подстилки березняков и черноольшаников обладают слабыми протекторными свойствами: содержание свинца в верхнем слое собственно почвы березняков достигает 84,22 мг/кг, или в 1,5 раза выше, чем ельниках.

Работа выполнена в рамках проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Х19Б-004 «Особенности распределения и миграции тяжелых металлов в почвах и растительных объектах экосистем в ареале площадки складирования свинецсодержащих отходов (пос. Зеленый Бор Ивацевичского района) с разработкой рекомендаций по минимизации экологических рисков».

Список использованной литературы

1. Власова, И. И. Культуры сосны обыкновенной на Сахалине / И. И. Власова, В. М. Ерёмин, А. В. Копанина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 1 (3). – С. 863–866.
2. Елпатьевский, П. В. Поглощение химических элементов древесной растительностью в различных эколого-геохимических условиях / П. В. Елпатьевский, В. С. Аржанова // География и природные ресурсы. – 1985. – № 3. – С. 117–125.
3. Добровольский, В. В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние / В. В. Добровольский. – М.: Мысль, 1983. – 272 с.
4. Добровольский, В. В. География почв с основами почвоведения / В. В. Добровольский. – М.: ВЛАДОС, 1999. – 384 с.
5. Добровольский, В. В. Микроэлементы в почвах и почвообразующих породах Казахстана / В. В. Добровольский // Почвоведение. – 1960. – № 2. – С. 15–23.
6. Воробейчик, Е. Л. Реакция почвенной биоты лесных экосистем Среднего Урала на выбросы медеплавильных комбинатов: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / Е. Л. Воробейчик. – Екатеринбург, 1995. – 24 с.
7. Григоренко, А. В. Влияние аэротехногенного загрязнения на компоненты лесной экосистемы (на примере минусинского ленточного бора): автореф. дис. ... канд. биол. наук / А. В. Григоренко. – Красноярск, 2016. – 196 с.
8. Комплексная экологическая оценка техногенного воздействия на экосистемы южной тайги / А. М. Степанов [и др.]. – М.: ЦЕПЛ, 1992. – 246 с.
9. Решетникова, Т. В. Лесные подстилки как депо биогенных элементов / Т. В. Решетникова // Вестник КрасГАУ. – 2011. – № 12. – С. 74–81.
10. Сибиркина, А. Р. Биогеохимическая оценка содержания тяжелых металлов в сосновых борах Семипалатинского Прииртышья: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Сибиркина А. Р. – Омск, 2014. – 496 с.
11. Щербов, Б. Л. Роль лесной подстилки в миграции химических элементов и искусственных радионуклидов при лесных пожарах в Сибири / Б. Л. Щербов // Сиб. экол. журн. – 2012. – № 2. – С. 253–265.
12. Litter accumulation in woodlands contaminated by Pb, Zn, Cd and Cu / P. J. Coughtrey, C. H. Jones, M. H. Martin, S. W. Shales // Oecologia (Berl.). – 1979. – Vol. 39, № 1. – P. 51–60.
13. Tyler, G. The impact of heavy metal pollution on forests: a case study of Gusum, Sweden / G. Tyler // Ambio. – 1984. – Vol. 13, № 1. – P. 18–24.
14. Lis, J. Anthropogenic soils pollution within the legnica-glogow copper district / J. Lis, A. Pasieczna // Proceedings of the Conference "Valorisation of the environment in the areas exposed to long term industrial and mining activities", Ustron, Poland, 2005. – Vol. 17. – P. 42–48.
15. Трюхина, Ю. Л. Анализ дисперсионного состава пылящих пляжей хвостохранилища ОАО «Ковдорский ГОК» / Ю. Л. Трюхина, А. В. Иванов // Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования современной науки: материалы IX молодежной Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 23–24 нояб. 2015 г. – North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2015. – С. 34–38.

16. Качество почвы. Определение содержания кадмия, хрома, кобальта, меди, свинца, марганца, никеля и цинка, экстрагированных царской водкой из почвы. Пламенный и электротермический методы атомно-абсорбционной спектрометрии. Технические условия : СТБ ISO 11047-2006. – Введ. 01.05.07. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2007. – 18 с.
17. Качество почвы. Определение микроэлементов в экстрактах почвы с использованием атомно-эмиссионной спектрометрии индуктивно связанной плазмы (ИСП-АЭС) = Якасць глебы. Вызначэнне мікраэлементаў у экстрактах глебы з выкарыстаннем атамна-эмісійнай спектраметрыі індуктыўна звязанай плазмы (ИСП-АЭС) : ГОСТ ISO 22036-2014 ; введ. РБ 01.04.17. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2016. – 24 с.
18. Добровольский, Г. В. Ландшафтно-геохимические критерии оценки загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами / Г. В. Добровольский // Почвоведение. – 1999. – № 5. – С. 639–645.
19. Рябова, Л. Н. Геохимическая характеристика почвенного покрова в долине р. Днепр / Л. Н. Рябова // Весці НАН Беларусі. Сер. хім. навук. – 2005. – № 4. – С. 69–75.
20. Минкина, Т. М. Взаимодействие тяжелых металлов с органическим веществом чернозема обыкновенного / Т. М. Минкина, Г. В. Мотузова, О. Г. Назаренко // Почвоведение. – 2006. – № 7. – С. 804–811.
21. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М. : Мир, 1989. – 439 с.
22. Ильин, В. Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение / В. Б. Ильин. – Новосибирск : Наука, 1991. – 151 с.

References

1. Vlasova I. I., Eryomin V. M., Kopanina A. V. *Kul'tury sosny obyknovЕННОj na Sahaline* [Scotch pine cultures on Sakhalin]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, no. 1, pp. 863–866. (in Russian)
2. Elpat'evskij P. V., Arzhanova V. S. *Pogloshchenie himicheskikh elementov drevesnoj rastitel'nost'yu v razlichnykh ekologo-geohimicheskikh usloviyah* [Absorption of chemical elements by woody vegetation in various ecological and geochemical conditions]. *Geografiya i Naturl Resursy = Geography and natural resources*, 1985, no. 3, pp. 117–125. (in Russian)
3. Dobrovol'skij V. V. *Geografiya mikroelementov. Global'noe rasseyanie* [Geography of microelements. Global scattering]. Moscow, 1983, 272 p. (in Russian)
4. Dobrovol'skij V. V. *Geografiya pochv s osnovami pochvovedeniya* [Soil geography with the basics of soil science]. Moscow, 1999, 384 p. (in Russian)
5. Dobrovol'skij V. V. *Mikroelementy v pochvah i pochvoobrazuyushchih porodah Kazakhstana* [Trace elements in soils and soil-forming rocks of Kazakhstan]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 1960, no. 2, pp. 15–23. (in Russian)
6. Vorobejchik E. L. *Reakciya pochvennoj bioty lesnykh ekosistem Srednego Urala na vybrosy medeplavil'nykh kombinatov : avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* [Response of soil biota of forest ecosystems of the Middle Urals to emissions from copper smelters. Abstract Ph. D. of biol. sci. diss.]. Ekaterinburg, 1995, 24 p. (in Russian)
7. Grigorenko A. V. *Vliyanie aerotekhnogenogo zagryazneniya na komponenty lesnoj ekosistemy (na primere minusinskogo lentochного bora) : avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* [Influence of aerotechnogenic pollution on the components of the forest ecosystem (on the example of the Minusinsk ribbon forest). Abstract Ph. D. of biol. sci. diss.]. Krasnoyarsk, 2016, 196 p. (in Russian)
8. Stepanov A. M. *Kompleksnaya ekologicheskaya ocenka tekhnogenogo vozdejstviya na ekosistemy yuzhnoj tajgi* [Comprehensive environmental assessment of technogenic impact on the ecosystems of the southern taiga]. Moscow, 1992, 246 p. (in Russian)
9. Reshetnikova T. V. *Lesnye podstilki kak depo biogennykh elementov* [Forest litter as a depot of biogenic elements]. *Vestnik KrasGAU = The Bulletin of KrasGAU*, 2011, no. 12, pp. 74–81. (in Russian)
10. Sibirskina A. R. *Biogeoхимическая оценка содержания тяжелых металлов в сосновых борах Семипалатинского Прииртышья : дис. ... kand. biol. nauk* [Biogeochemical assessment of the content of heavy metals in the pine forests of the Semipalatinsk Irtysh region. Abstract PhD of biol. sci. diss.]. Omsk, 2014, 496 p. (in Russian)
11. Shcherbov B. L. *Rol' lesnoj podstilki v migracii himicheskikh elementov i iskusstvennykh radionuklidov pri lesnykh pozharah v Sibiri* [The role of forest litter in the migration of chemical elements and artificial radionuclides during forest fires in Siberia]. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal = Siberian Ecological Journal*, 2012, no. 2, pp. 253–265. (in Russian)
12. Coughtrey P. J., Jones S. N., Martin M. N., Shales S. W. Litter accumulation in woodlands contaminated by Pb, Zn, Cd and Cu. *Oecologia (Berl.)*, 1979, no. 1, pp. 51–60.
13. Tyler G. The impact of heavy metal pollution on forests: a case study of Gusum, Sweden. *Ambio*, 1984, no. 1, pp. 18–24.
14. Lis J., Pasiieczna A. Anthropogenic soils pollution within the legnica-glogow copper district. Proc. Conf. "Valorisation of the environment in the areas exposed to long term industrial and mining activities". Ustron, Poland, 2005, pp. 42–48.
15. Tryuhina Y. L., Ivanov A. V. *Analiz dispersionogo sostava pylyashchih plyazhej hvostohranilishcha OAO "Kovdorskij GOK"* [Analysis of the dispersion composition of the dusty beaches of the tailing dump of JSC Kovdorsky GOK]. *Shag v budushchee: teoreticheskie i prikladnye issledovaniya sovremennoj nauki : materialy IX molodyozhnoj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodykh uchyonykh* [Proc. IX Youth practical conf. of students, graduate students and young scientists "Step into the future: theoretical and applied research of modern science"]. Sankt-Petersburg, 2015, pp. 34–38. (in Russian)
16. STB ISO 11047-2006. *Kachestvo pochvy. Opredelenie soderzhaniya kadmiya, hroma, kobal'ta, medi, svinca, manganca, nikelya i cinka, ekstragirovannykh carskoj vodkoj iz pochvy. Plamennyj i elektrotermicheskij metody atomno-absorbционной спектрометрии* [Specifications ISO 11047-2006. Soil quality. Determination of the content of cadmium, chromium, cobalt, copper, lead, manganese, nickel and zinc extracted from the soil with aqua regia. Flame and

- electrothermal methods of atomic absorption spectrometry]. Minsk, Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2007, 18 p. (in Russian)
17. GOST ISO 22036–2014. *Kachestvo pochvy. Opredelenie mikroelementov v ekstraktah pochvy s ispol'zovaniem atomno-emissionnoj spektrometrii induktivno svyazannoj plazmy (ISP-AES)* [State Standard 22036–2014. Soil quality. Determination of trace elements in soil extracts using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ISP-AES)]. Minsk, Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2016. 24 p. (in Russian)
 18. Dobrovolskij G. V. *Landshaftno-geohimicheskie kriterii ocenki zagryazneniya pochvennogo pokrova tyazhelymi metallami* [Landscape-geochemical criteria for assessing soil pollution with heavy metals]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 1999, no. 5, pp. 639–645. (in Russian)
 19. Ryabova L. N. *Geohimicheskaya harakteristika pochvennogo pokrova v doline r. Dnepr* [Geochemical characteristics of the soil cover in the valley of the river. Dnepr]. *Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya himicheskikh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series*, 2005, no. 4, pp. 69–75. (in Russian)
 20. Minkina T. M., Motuzova G. V., Nazarenko O. G. *Vzaimodejstvie tyazhelykh metallov s organicheskim veshchestvom chernozema obyknovennogo* [Interaction of heavy metals with organic matter of ordinary chernozem]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 2006, no. 7, pp. 804–811. (in Russian)
 21. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Mikroelementy v pochvah i rasteniyah* [Trace elements in soils and plants]. Moscow, 1989, 439 p. (in Russian)
 22. Il'in V. B. *Tyazhelye metally v sisteme pochva-rastenie* [Heavy metals in the soil-plant system]. Novosibirsk, 1991, 151 p. (in Russian)

Информация об авторах

Николай Васильевич Михальчук – кандидат биологических наук, доцент, директор, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, г. Брест, Беларусь). E-mail: info@paei.by

Полина Владимировна Качанович – младший научный сотрудник, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, г. Брест, Беларусь). E-mail: tyres810@gmail.com

Андрей Николаевич Ажгиревич – кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, г. Брест, Беларусь). E-mail: andy5170001@gmail.com

Михаил Михайлович Дашкевич – научный сотрудник, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, г. Брест, Беларусь). E-mail: dashkevich.m.m@gmail.com

Information about the authors

Mikalay V. Mikhalchuk – Ph. D. (Biological), Associate Professor, Director of the Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus (Soviet Border Guards Str., 41, 224030, Brest, Belarus). E-mail: info@paei.by

Polina V. Kachanovich – Junior Researcher, Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus (Soviet Border Guards Str., 41, 224030, Brest, Belarus). E-mail: tyres810@gmail.com

Andrey N. Ashgirevich – Ph. D. (Biological), Associate Professor, Deputy Director, Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus (Soviet Border Guards Str., 41, 224030, Brest, Belarus). E-mail: andy5170001@gmail.com

Michael M. Dashkevich – Researcher, Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus (Soviet Border Guards Str., 41, 224030, Brest, Belarus). E-mail: dashkevich.m.m@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-56-70>
УДК 550.4:551.3(476.7)

Поступила в редакцию 11.05.2022
Received 11.05.2022

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ НА ТЕРРИТОРИИ МАЛОГО ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ Г. НЕСВИЖА)

Ю. А. Романкевич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты геохимических исследований почв на территории г. Несвижа в контексте распределения тяжелых металлов. Выполнена статистическая обработка данных. Для целей исследования был рассчитан региональный и местный геохимический фон. Выявлены особенности обогащения и загрязнения городских почв исследуемыми компонентами. Рассчитаны коэффициенты концентрации и суммарный коэффициент загрязнения. Построены монокомпонентные и поликомпонентная картосхемы, отражающие выявленные закономерности распределения тяжелых металлов. Приведены результаты выполнения корреляционного и факторного анализов. Выявлены ассоциации тяжелых металлов, характерных для почв города. Рассчитаны факторные нагрузки. Приведено графическое отображение матрицы факторных нагрузок. Установлены факторы, ответственные за формирование техногенной обстановки, определен их вклад. Построена картосхема факторных нагрузок. Выполнена интерпретация геохимических данных как на уровне отдельных точек, так и в пространстве всего города.

Ключевые слова: городские почвы; тяжелые металлы; геохимические данные; непараметрические методы исследований.

Для цитирования. Романкевич Ю. А. Распределение тяжелых металлов в почвах на территории малого города (на примере г. Несвижа) // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 56–70.

DISTRIBUTION OF HEAVY METALS IN SOILS ON THE TERRITORY OF THE SMALL TOWN (ON THE EXAMPLE OF NESVIZH)

J. A. Ramankevich

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

Abstract. The results of geochemical studies of soils on the territory of Nesvizh are presented in the context of the distribution of heavy metals. Statistical data processing has been performed. For the purposes of the study, the regional and local geochemical background was calculated. The features of enrichment and pollution of urban soils by the studied components are revealed. The concentration coefficients and the total pollution coefficient are calculated. Mono-component and polycomponent maps were constructed, reflecting the revealed regularities in the distribution of heavy metals. The results of correlation and factor analyses are presented. Associations of heavy metals, typical for the soils of the city, were revealed. Factor loadings are calculated. A graphical representation of the matrix of factor loadings is given. The factors responsible for the formation of the technogenic situation have been established, and their contribution has been determined. The map of factor loadings has been constructed. The interpretation of geochemical data both at the level of individual points and in the space of the entire city was carried out.

Keywords: urban soils; heavy metals; geochemical data; nonparametric research methods.

For citation. Ramankevich J. A. Distribution of heavy metals in soils on the territory of the small town (on the example of Nesvizh). *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 56–70.

Введение. Широкий интерес к изучению почв городов возник в начале 1980-х гг. Объектами исследований становятся преимущественно многонаселенные города и промышленные центры. Городские территории таких населенных пунктов весьма специфичны: значительные площади являются запечатанными, и лишь небольшая их доля приходится на открытые поверхности, которые представлены антропогенными почвами и грунтами, в высокой степени трансформированными [1–5].

В научной литературе значительное внимание уделено наиболее распространенным почвам многонаселенных городов и вместе с тем наиболее антропогенно-трансформированным, во многом утратившим естественные признаки. Педогенная эволюция таких почв настолько слаба, что профиль отражает лишь свойства почвообразующей породы или техногенной конструкции [1].

Изучение воздействия городской среды на антропогенно-преобразованные почвы, выявление особенностей и закономерностей изменений, прогнозирование и оценка последствий геохимических трансформаций в условиях развития урбанизации продолжает оставаться актуальным направлением научных исследований [3, 5].

В то же время городские почвы, в большей степени сохранившие естественные признаки, исследованы недостаточно. В этом контексте определенный научный интерес в качестве объектов геохимических исследований вызывают малые города, на территории которых представлены виды как антропогенных, так и естественных почв, а также характерен многолетний устоявшийся режим использования территорий и ограниченный спектр факторов техногенного воздействия.

Объектом исследований явился почвенный покров г. Несвижа с более чем 570-летней историей. Выбор объекта обусловлен небольшой площадью города (10,3 км²), многолетним устойчивым регламентом использования городских территорий с разнообразным сочетанием почвенно-ландшафтных условий и традиционных техногенных нагрузок, характерных для малонаселенных урбанизированных пространств. Имеющиеся архивные и картографические материалы, датированные началом XVII в., документально свидетельствуют о том, что функциональное использование 65 % территории города на протяжении нескольких сотен лет практически не изменялось и представлено преимущественно высокоплотной усадебной застройкой, что детально отражено на картосхемах и гравюрах, сохранившихся до наших дней.

Цель работы – выявить особенности распределения тяжелых металлов (ТМ) в почвах на территории г. Несвижа. Для этого реализовывали следующие задачи: проведение натурных эколого-геохимических исследований, статистическую обработку и интерпретацию геохимических данных.

Фактической основой работы явились результаты эколого-геохимического изучения г. Несвижа. Опробование поверхностного почвенного горизонта осуществлялось с глубины 0–10 см, при отборе учитывались почвенно-ландшафтные условия и функциональное использование территории. Полевые исследования проводились в 2014–2018 гг.

Анализ валового содержания химических элементов в почвенных пробах выполнялся методом атомно-абсорбционной спектроскопии в аккредитованной лаборатории с соблюдением соответствующих методик. Определяли содержание Cd, Zn, Pb, Cu, Ni, Cr.

Обработка данных включала: вычисление статистических параметров и проверку гипотез о соответствии распределения параметра нормальному [2]; разделение многомерных данных на выборки по геохимическим параметрам [2]; исключение аномальных объектов выборок [5]; вычисление геохимического фона [6–8]; разделение геохимических данных на выборки в соответствии с принадлежностью пробных площадок к функциональным зонам; построение моделей пространственного распределения данных (моноэлементные и полиэлементные картосхемы) [2]; выполнение корреляционного и факторного анализов [2, 8–11]; графическое отображение матрицы факторных нагрузок [8, 10, 12, 13]; построение моделей пространственного отображения факторов (карты факторов) [2, 13]; выделение ассоциаций химических элементов на основании многомерных статистических методов [8, 12]; выдвижение и проверку гипотез о связи конкретного техногенного фактора с выделяемой ассоциацией; интерпретацию полученных результатов.

Статистическая обработка данных также включала: оценку закона распределения величин с помощью гистограмм, графиков распределения и критерия Колмогорова – Смирнова; вычисление основных параметров содержания микроэлементов в почвах: среднее арифметическое при нормальном и среднее геометрическое (\bar{g}) – при логарифмически нормальном (\ln) распределении; стандартное отклонение и стандартный множитель (\ln); непараметрический дисперсионный анализ Краскела – Уоллиса (Kruskal – WallisTest).

Факторный анализ выполнялся на основе корреляционной матрицы, методом главных компонент с последующим варимакс-вращением. Критическое значение уровня значимости принималось равным 5 % [8, 9, 13]. Статистические анализы, проверка гипотез, построение векторных графиков и картосхем осуществлялись с использованием языка программирования R в среде Rstudio [14].

Для определения регионального геохимического фона ($C_{\text{рег.}}$) [6–8, 15] использовался прямой (геохимический или эмпирический) подход. На основании официальной статистики Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь (далее – НСМОС) формировалась выборка из многолетних данных (НСМОС, 2011–2021 гг.), отражающих концентрации ТМ в почвах фоновых территорий Минской области, не подвергшихся антропогенному воздействию, при этом фон представлялся фиксированным значением – медианой. Определенные значения представляли собой гипотетический базовый критерий, без учета естественной вариации содержания химических элементов в исследуемом компоненте окружающей среды. Функция распределения также игнорировалась. Согласно [6] средние концентрации химических элементов в почвах фоновых территорий, рассчитанные за многолетний период, находились на уровне природных вариаций.

Для определения местного геохимического фона ($C_{\text{ф}}$) [15] использовали непрямой (статистический) метод: базу данных подвергали «очистке» – процессу обнаружения и отсеивания экстремальных

значений в выборке с помощью статистических тестов [16]. Также рассчитывали допустимую погрешность [17].

Для оценки эколого-геохимического состояния почв использовали следующие показатели: коэффициент концентрации (K_k), представляющий собой отношение содержания элемента в почве к фоновому значению ($C_{\text{фог}}$); суммарный показатель загрязнения (Z_c), который также рассчитывали относительно фоновых значений, значимыми принимали коэффициенты при граничном критерии: $K_k > 2$ [18].

Характеристика объекта исследований. В геоморфологическом отношении территория города представляет собой пологоволнистую флювиогляциальную равнину сожского возраста. В пределах города распространены вторично-моренные ландшафты на дерново-подзолистых почвах. Согласно созданной ретроспективной карте [19] естественный почвенный покров исследуемого города представлен:

– дерново-подзолистыми местами эродированными почвами, преимущественно супесчаными на связных супесях, с глубины 0,4–1,0 м подстилаемыми моренными связными, реже – рыхлыми песками или моренными суглинками;

– дерново-подзолистыми заболоченными, преимущественно суглинистыми, реже – супесчаными на легких пылеватых суглинках, местами – с намытым верхом, реже – на связных песчанисто пылеватых водно-ледниковых супесях, местами с намытым верхом, с глубины 0,3–0,9 м подстилаемые моренными суглинками, редко – водно-ледниковыми рыхлыми песками.

Менее распространенными в пределах малого города были определены дерновые заболоченные почвы, представленные одной почвенной разновидностью, а также торфяно-болотные низинные почвы.

В соответствии с функциональным назначением Несвиж относится к числу туристско-рекреационных городов. Архитектурно-планировочная структура двухъядерная, компактная с развитой сетью автодорог. Основным композиционным элементом считается каскад русловых прудов, разделяющий город на две части. Общественный центр окружен высокоплотной усадебной застройкой, занимающей более 70 % городской территории. Крупные промышленные предприятия в городе отсутствуют. Предположительно основную нагрузку формирует аэротехногенный фактор, обеспечиваемый выбросами от сжигания топлива, также важным фактором загрязнения городской среды является агротехногенный.

Результаты и их обсуждение. Основные статистические параметры распределения шести исследуемых элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные статистические параметры распределения тяжелых металлов в почвах на территории г. Несвижа

Table 1. The main statistical parameters of the distribution of heavy metals in the soils on the territory of Nesvzh

Показатель	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
Минимум	6,47	15,00	18,04	5,89	26,11	0,56
Максимум	15,54	43,20	171,74	174,77	203,29	1,36
Медиана, М	9,62	27,41	26,88	9,75	46,52	0,91
Мода, M_o	10,24	33,33	23,86	8,98	43,16	1,03
Среднее, С	9,47	26,86	31,45/3,446 _{ln}	10,62/2,363 _{ln}	53,24/3,975 _{ln}	0,92
Стандартное отклонение/стандартный множитель, σ/ϵ	1,74	5,97	1,55 _{ln}	1,73 _{ln}	1,66 _{ln}	0,18
Коэффициент асимметрии, A_s	0,44	0,23	4,03	6,62	2,43	0,16
Коэффициент эксцесса, E_k	1,63	0,02	20,80	45,51	4,19	–0,35
Коэффициент вариации, C_v	18,37	22,23	68,25	168,04	65,07	19,07
Верхний предел аномальных значений	14,68	44,78	116,18	54,70	241,70	1,45
Встречаемость значений выше ПДК/ОДК*, %	–	–	36	2	38	100
Максимальная кратность превышения ПДК/ОДК*	–	–	5,4	5,3	3,7	2,7
ПДК/ОДК	20	100	32	33	55	0,5

*ПДК/ОДК приняты в качестве допустимых величин при оценке загрязнения почв и лучшей демонстрации результатов данного исследования в сравнении с использованием пороговых величин для тех же целей.

Коэффициенты вариации, рассчитанные для Ni, Cr и Cd не превышают 33 %, что позволяет сделать вывод о незначительной вариабельности данных элементов и однородности исследуемых совокупностей. В свою очередь, коэффициенты вариации, характеризующие распределение Zn, Pb и Cu указывают на высокую вариацию компонентов в почвах города и неоднородность выборки. Отклонение эмпирического ряда по коэффициентам асимметрии и эксцесса от нормального распределения

не существенно в отношении распределения Ni, Cr и Cd, и, напротив, существенно для Zn, Pb и Cu (см. табл. 1).

Проверяли гипотезу о подчинении типа распределения выборки нормальному закону с помощью критерия согласия Колмогорова – Смирнова, применение которого фактически формализует и обосновывает процедуру визуального сравнения. Отклонение от нормального распределения считали существенным при уровне значимости менее 0,05.

Гистограммы распределения, оценка параметров и проверка статистических гипотез функции распределения ТМ в почвенном покрове г. Несвижа позволили сделать вывод о характере распределения Ni, Cr и Cd, подчиняющегося нормальному закону, а Zn, Pb и Cu – логнормальному. Это явилось основанием для выбора средних арифметических и средних геометрических значений для совокупностей данных, подчиняющихся разным законам распределения, а также указало на необходимость процедуры логарифмирования данных для дальнейших расчетов (см. табл. 1).

На следующем этапе выборку анализировали на предмет аномальных значений. В качестве критерия аномальности принимали минимально аномальную концентрацию, рассчитываемую по формуле с учетом характера распределения: $C_a \geq C + 3\sigma$ или $C_a \geq C + 3\varepsilon$. Значения, превышающие верхний предел аномальных значений (см. табл. 1), из выборки исключали, затем рассчитывали средние значения без учета выбросов, а также коэффициенты концентраций (табл. 2).

Таблица 2. Содержание и коэффициенты концентраций тяжелых металлов в почвах на территории г. Несвижа

Table 2. The content and concentration factors of heavy metals in the soils on the territory of Nesvzh

Показатель	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
Среднее содержание элемента, $C_{ф}$, мг/кг	9,34	26,86	30,29	10,03	53,24	0,92
Максимальное содержание элемента, $C_{макс}$, мг/кг	11,9	43,2	75,0	30,0	203,3	1,4
Коэффициент концентрации для средних значений, $K_k = C / C_{рег}$	2,8	5,5	6,3	2,0	2,3	6,6
Коэффициент концентрации для максимальных значений, $K_{k_{макс}} = C_{макс} / C_{рег}$	3,6	8,8	15,6	6,1	8,7	9,7
Региональный фон, $C_{рег.}$, мг/кг	3,30	4,90	4,80	4,95	23,35	0,14

Если порядок содержания ТМ, определенный для фоновых территорий ($C_{рег.}$, мг/кг), представить некоторой условной последовательностью в виде $Zn_{23,4} > Cu_{5,0} > Cr_{5,0} > Pb_{4,8} > Ni_{3,3} > Cd_{0,1}$, то осредненные данные, характеризующие почвенный покров г. Несвижа, будут представлены следующим образом: $Zn_{53,2} > Pb_{30,3} > Cr_{26,9} > Cu_{10,0} > Ni_{9,3} > Cd_{0,9}$. Очевидно, что концентрации всех исследуемых элементов в почвах на территории г. Несвижа превышают фоновые и накапливаются с разной интенсивностью.

Так, для отображения интенсивности обогащения ТМ использовали коэффициенты концентраций, рассчитанные на основании средних содержаний ТМ в почвах на территории г. Несвижа и вы-

строенные в порядке убывания: $\frac{Cd, Pb, Cr}{6,6 - 5,5} > \frac{Ni, Zn, Cu}{2,8 - 2,0}$. Данный ряд демонстрирует, что уровень

обогащения Ni, Zn и Cu является близким к фоновому, тогда как содержание Cd, Pb и Cr превышает соответствующее природным вариациям значение почти в 6–7 раз.

Ряд, составленный на основании коэффициентов концентрации, рассчитанных по максимальным содержаниям ТМ в почвах на территории г. Несвижа (см. табл. 2), демонстрирует следующий

порядок: $\frac{Pb}{15,6} > \frac{Cd, Cr, Zn}{9,7 - 8,7} > \frac{Cu, Ni}{6,1 - 3,6}$. Данное выражение иллюстрирует те же приоритетные в обо-

гащении компоненты: Pb, Cd и Cr, при возрастающей роли Pb в сравнении с рядом средних значений. Отмечается также некоторая заметная контрастность в интенсивности обогащения: Zn – в 3,8 раза, а также Pb и Cu – в 2,0–3,0 раза. Коэффициент концентрации для максимальных значений позволяет рассматривать их в качестве загрязнителей.

Таким образом, статистические параметры выборки (см. табл. 1) сообщают о наибольшей вариабельности в распределении Cu, Pb и Zn, коэффициенты концентраций (см. табл. 2) демонстрируют возрастающую контрастность данных компонентов в пространстве почвенного покрова г. Несвижа относительно условного фона ($C_{рег.}$). Среди приоритетных накапливающихся компонентов, наряду со Pb, были определены также Cd и Cr, поступление которых, очевидно, обеспечено техногенным фактором.

По сравнению с местным фоном ($C_{\text{ф}}$) почвы города в среднем обогащены Zn – в 1,2 раза, Pb и Cu – в 1,1 раза. Содержание остальных элементов соответствует фоновым значениям.

Для характеристики особенностей распределения элементов в почвенном покрове г. Несвижа были построены моноэлементные картосхемы (рис. 1). При составлении картосхем аналитические данные были выражены посредством коэффициентов концентраций и разбиты на классы (A, B, C, D), исходя из диапазонов значений $K_{\text{к}}$. Так, к классу A были отнесены значения близкие к фоновым ($K_{\text{к}} \leq 2$), к B – значения, эквивалентные 2–5 фоновым величинам, к C – значения, соответствующие 5–10 и к D – превышающие фон более чем в 10 раз (см. рис. 1). При этом значения, соответствующие $K_{\text{к}} \geq 10$, считались контрастно аномальными [2].

Никель, хром и кадмий. Установленное содержание Ni в почвах на территории г. Несвижа изменяется в пределах 6,5–11,9 (15,5) мг/кг. Распределение данного компонента отличается однородностью (см. рис. 1), о чем свидетельствуют значения коэффициента концентрации в диапазоне 2,0–3,6 раза. Территория города приурочена к Центральной литогеохимической провинции покровных отложений Беларуси, которая характеризует поведение Ni как стремящегося к накоплению. Кроме того, наиболее высокие концентрации Ni характерны как раз для дерново-подзолистых почв на моренных отложениях, при этом максимум фиксируется в гумусовом горизонте.

Распределение Cr в естественных почвах, согласно приуроченности к литогеохимической провинции, характеризуется значительной вариабельностью, при этом, как и для Ni, отмечаются наибольшие значения для дерново-подзолистых почв на моренных отложениях. Содержание Cr в почвах на территории г. Несвижа варьирует в диапазоне 15,0–43,2 мг/кг, при среднем значении 26,9 мг/кг, что сообщает о накоплении компонента в 3,1–8,8 относительно регионального геохимического фона, однако большинство значений находится в диапазоне от 4 до 6 значений $K_{\text{к}}$. В целом распределение Cr в почвах города довольно однородно, отмечается тенденция к уменьшению концентраций от центра – к периферии. Среднее содержание Cd в почвах на территории г. Несвижа – 0,92 мг/кг, при разбросе значений в пределах 0,56–1,36 мг/кг, что соответствует превышению фонового уровня – в 4,0–9,7 $K_{\text{к}}$. При этом большинство значений соответствует 7–8 $K_{\text{к}}$. Равномерность распределения Cd также демонстрирует картосхема (см. рис. 1).

Распространение Cd в почвах фоновых территорий, согласно данным НСМОС, находится в пределах от 0,10–0,97 мг/кг, при среднем значении – 0,14 мг/кг. Что свидетельствует о превышении содержания допустимых значений даже в пределах территорий, свободных от техногенных нагрузок. Принимая во внимание этот факт, превышение допустимых нагрузок по содержанию Cd в пределах городских территорий Несвижа (в 2,7 раза) как высоко токсичного компонента (I класс опасности) не дает оснований для выделения аномалии, характерной сугубо для городской территории исследуемого города.

При рассмотрении природных предпосылок к накоплению данных компонентов на данном этапе исследования можно отметить, что их роль более существенна для Ni и в меньшей степени для Cr. О степени влияния природного фактора на распределение Cd судить сложно в силу особенностей метода определения компонента, характеризующего высокой долей погрешности. В то же время порядок превышения фоновых значений указывает на влияние техногенного фактора при распределении компонентов, в большей степени для Cr и в меньшей – для Ni.

Таким образом, с одной стороны, однородность распределения Ni, Cr и Cd демонстрируют статистические параметры выборки, где основополагающее значение принадлежит коэффициенту вариации, соотношению величин моды, медианы и средних арифметических, а также типу распределения, с другой стороны, рассчитанные коэффициенты концентраций и их иллюстрация на картографической основе подтверждают низкую вариабельность значений, а также показывают относительную равномерность распределения данных компонентов в пространстве города (см. табл. 1, 2; см. рис. 1). В свою очередь, распределение **меди, цинка и свинца**, напротив, характеризует высокая вариабельность выборки и большая контрастность (см. рис. 1). Так, содержание Cu находится, в основном, в диапазоне от 5,9 до 30,0 мг/кг, характеризуется средним значением 10,0 мг/кг, что соответствует 1,2–6,1 $K_{\text{к}}$. Около половины значений отмечается на уровне фоновых, другая часть – в диапазоне от 2 до 5, единичные контрастно аномальные значения приурочены к местам хранения автотранспорта и в пределах усадебной застройки. Общая тенденция в распределении Cu проявляется в уменьшении концентраций от центра – к периферии. Традиционно, накопление Cu связывают со сжиганием топлива, а также с бытовым загрязнением. В распределении Zn так же, как и в отношении Cu, сохраняется принцип уменьшения концентраций «от центра – к периферии», также прослеживается связь наибольших значений и мест хранения автотранспорта, очевидно приуроченность к усадебной застройке. Диапазон концентраций Zn находится в пределах от 26,1 до 203,3 (241,7) мг/кг, при среднем значении 53,2 мг/кг. Коэффициенты концентраций отмечаются в широких пределах – от 1,1 до 8,7. Установлено превышение допустимых нагрузок, при этом максимальное значение выборки превышает ОДК в 5,3 раза.

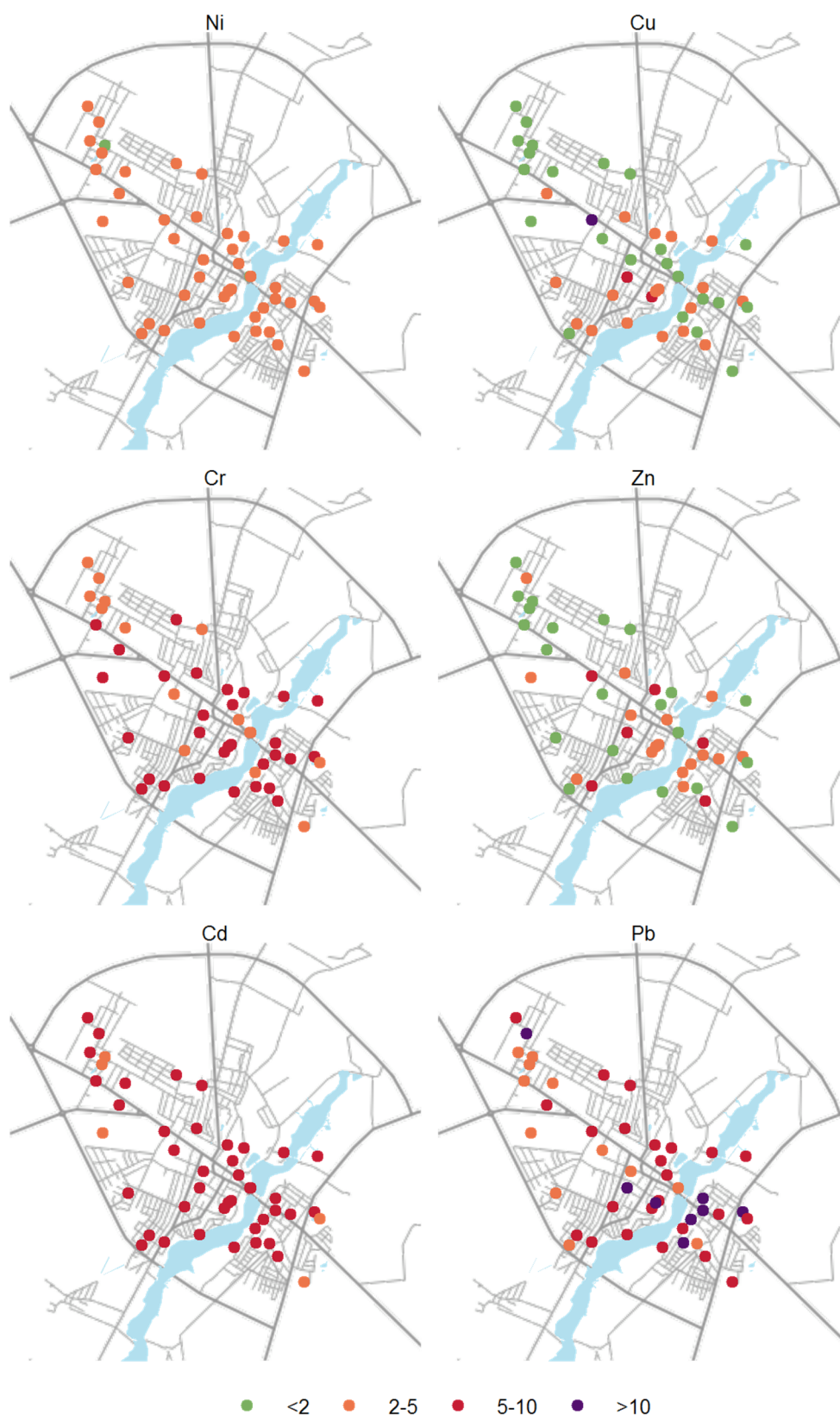


Рис. 1. Картосхемы распределения Ni, Cr, Cd, Cu, Zn и Pb в почвенном покрове г. Несвижа, Кк

Fig. 1. Distribution maps of nickel, chromium, cadmium, copper, zinc and lead in the soil cover of Nesvizh, Kk

Среди числа всех исследуемых компонентов Pb наиболее контрастен, о чем свидетельствуют пределы его обнаружения в почвах на территории г. Несвижа в диапазоне от 18,0 до 75,0 (171,7) мг/кг, при среднем содержании 30,3 мг/кг. Концентрации Pb в пределах фоновых территорий находятся в диапазоне от 2,2 до 21,3 мг/кг, что значительно ниже полученных нами значений для почвенного покрова г. Несвижа.

В основном превышение фонового значения, определенного для Pb, отмечается на уровне 3,8–15,6 К_к. При этом, согласно рис. 1, большинство точек находится в диапазоне от 2 до 10 К_к и в этих пределах распределяется довольно хаотично при некоторой концентрации в центральной части города. Pb является единственным компонентом среди числа изучаемых в рамках настоящего исследования, превышающим фоновые значения более чем в 10 раз, что согласно [2] указывает на контрастную аномалию.

Точки, значения которых формируют аномалию, отобраны в пределах территорий с разным функциональным назначением, часть из которых приурочена:

- к паркам по ул. Слуцкой, ул. Кирова, в также в районе ул. Сырокомли;
- к территории «Несвижского государственного колледжа имени Якуба Коласа», расположенного в здании Монастырского комплекса бенедиктинок, построенном в 1596 г. и в значительной степени сохранившемся до наших дней, включая прилегающие территории;
- к территории автопарка № 8 и ОАО «Несвижский райагросервис».

Ввиду отсутствия крупных промышленных предприятий, при наличии развитой автомобильной сети и возрастающей роли транспортной нагрузки в г. Несвиже как в туристическом центре, именно автотранспорт является очевидным, постоянным и длительным источником техногенного воздействия на почвенный покров города, что подтверждают приоритетные загрязнители и особенности их распределения.

На территории города выделено пять функциональных зон: производственная (промышленно-складская), транспортная, жилая, общественного назначения и рекреационно-ландшафтная. Дифференциацию содержаний ТМ по функциональным зонам демонстрирует рис. 2.

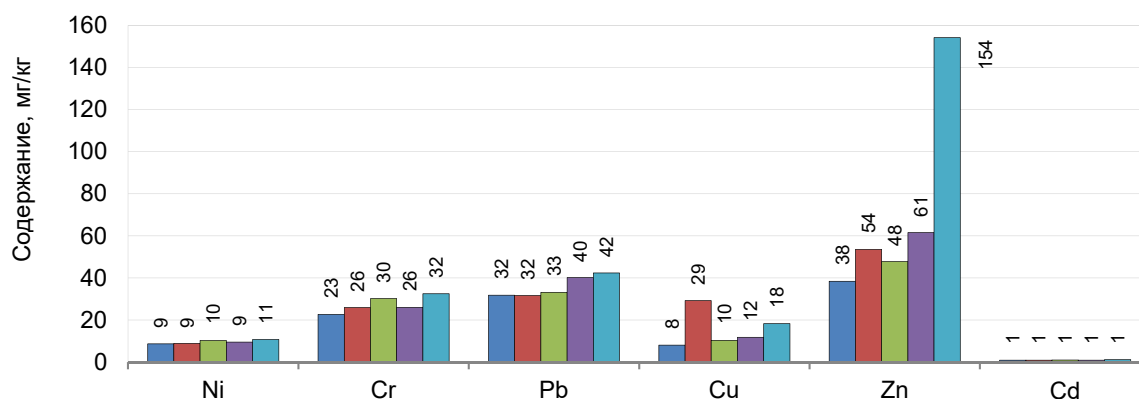


Рис. 2. Среднее содержание тяжелых металлов в почвах различных функциональных зон г. Несвижа

Fig. 2. Average content of heavy metals in soils of various functional zones of Nesvizh

Оценка значимости различий в содержании ТМ по функциональным зонам проводилась с помощью рангового дисперсионного анализа Краскела – Уоллиса (Kruskal – WallisTest). Результаты теста свидетельствуют о том, что выборку данных по функциональным зонам характеризует статистически достоверное распределение Cr, Cu и Zn и, напротив, недостоверное Ni, Pb и Cd ($p > 0,05$) (табл. 3).

Таблица 3. Результаты рангового дисперсионного анализа Краскела – Уоллиса

Table 3. Results of the Kruskal – Wallis test

Показатель	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
χ^2	7,433	14,681	3,192	14,139	14,831	4,962
df	4	4	4	4	4	4
p	0,1147	0,0054	0,5261	0,0068	0,0050	0,2912

Таким образом, ввиду статистически недостоверных различий, выявленных при распределении половины исследуемых компонентов по функциональным зонам, было принято решение об изучении нагрузок для каждой точки в отдельности и городской среды в целом.

Для демонстрации суммарного загрязнения была построена **поликомпонентная картосхема** (рис. 3). Оценка техногенного загрязнения почвенного покрова г. Несвижа по шкале экологической опасности, основанной на расчете суммарных показателей загрязнения, позволяет отнести 18 % проб выборки к незагрязненным, 72 % – к умеренно опасным и 10 % – опасным. При составлении картосхемы была использована шкала согласно [18].



Рис. 3. Картосхема суммарных показателей загрязнения почвенного покрова г. Несвижа, Z_c

Fig. 3. Map of the total indicators of soil pollution of the town of Nesvizh, Z_c

Результаты оценки, выполненной на основании коэффициента суммарного загрязнения, хорошо согласуются с монокомпонентными распределениями ТМ (см. рис. 1). Так, определяющее значение в формирование данного показателя вносят Cu, Zn и Pb, являясь наиболее контрастными в своем накоплении на фоне меньшей вариабельности Ni, Cr и Cd. Максимальные значения Z_c (34,1–54,8) во многом соотносятся с точками, формирующими контрастную свинцовую аномалию согласно показателям K_k (см. рис. 1). Также, на фоне умеренно-опасного уровня Z_c (16,2–30,5), характерного для большинства исследуемых точек, ярко проявляются участки, соответствующие допустимому фоновому уровню Z_c (13,3–15,5) согласно [2, 18].

Согласно картосхеме (рис. 3), незагрязненные участки тяготеют к окраинам города, что справедливо демонстрирует наименьшую техногенную нагрузку. Кроме того, привлекают внимание точки с низкими значениями Z_c в центре города, особенно те из них, которые расположены вблизи с опасно высокими показателями. Этот факт указывает на подсыпку почв с целью улучшения качества газонов и клумб, при этом фактически «очищая» загрязненные участки, демонстрируя контраст на фоне во многом равномерной техногенной нагрузки исследуемого города.

Итак, статистические параметры выборки и рассчитанные коэффициенты позволили определить вариабельность содержаний ТМ в почвах на территории г. Несвижа, продемонстрировать порядок накопления и определить приоритетные загрязнители. Корреляционный анализ содержаний элементов, в свою очередь, позволит оценить характер связей между исследуемыми компонентами.

Корреляционный анализ. Обобщенная корреляционная матрица, рассчитанная по всей совокупности данных ($n = 50$), приведенная на рис. 4, а сообщает, что большинство химических элементов объединено положительными корреляционными связями. При оценке учитывались лишь наиболее высокие значения коэффициентов корреляции ($r \geq 0,5$), свидетельствующие о сильных (0,7–0,9) и средних связях (0,5–0,6). На основании корреляционного анализа было установлено, что сильные связи характерны для пар: Ni – Cr, Ni – Cd и Cd – Cr, а средние – для Cd – Zn. Таким образом, Ni, Cd, Cr, а также Zn объединены достаточно высокими корреляционными связями и представляют устойчивую ассоциацию элементов.

Также были рассчитаны коэффициенты корреляции для совокупности данных, полученных после исключения выявленных в почвах на территории г. Несвижа аномальных концентраций (выбро-

сов) ТМ [2, 20]. Полученная корреляционная матрица позволила схематически представить связи между элементами следующим образом (рис. 4, б). Анализ связей между коррелирующимися элементами показал, что и для этой выборки ассоциации элементов, как и характер связей между ними, сохраняются. В выявленной группе основным звеном по-прежнему является Cr – Ni – Cd – Zn, но увеличивается число устойчивых связей в парах, образуемых Zn: Zn – Cr и Zn – Ni. Кроме того, проявляются связи с высокой и средней степенью корреляции, образуемые Cu: Cu – Zn, Cu – Cd, Cu – Cr, Cu – Pb и Cu – Ni. Стоит отметить, что Pb остается, по сути, единственным компонентом, с наименьшим числом значимых корреляционных связей.

	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
Ni	1,00					
Cr	0,89	1,00				
Pb	0,20	0,04	1,00			
Cu	0,22	0,15	0,17	1,00		
Zn	0,45	0,45	0,35	0,37	1,00	
Cd	0,76	0,64	0,25	0,33	0,54	1,00

а (a)

	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
Ni	1,00					
Cr	0,88	1,00				
Pb	0,30	0,22	1,00			
Cu	0,55	0,58	0,58	1,00		
Zn	0,50	0,52	0,47	0,84	1,00	
Cd	0,71	0,59	0,25	0,54	0,54	1,00

б (b)

Рис. 4. Корреляционная матрица содержаний микроэлементов в почвах на территории г. Несвижа, построенная: а – по совокупности всех фактических значений; б – по фактическим значениям, за вычетом аномальных

Fig. 4. Correlation matrix of microelement contents in the soils on the territory of Nesvizh, constructed: а – based on the totality of all actual values; б – according to the actual values, minus the anomalous ones

Таким образом, анализ двух корреляционных матриц, рассчитанных с учетом аномальных содержаний элементов и без них, свидетельствует, что для почвенного покрова г. Несвижа характерно наличие двух устойчивых ассоциаций коррелирующих между собой элементов, обе из которых обусловлены длительным техногенным воздействием: Ni – Cr – Cd и Cu – Zn – Pb. Вероятно, обе ассоциации формируются при осаждении выбросов автотранспорта и теплоэнергетических установок, в данном случае котельных.

Факторный анализ был выполнен для проверки гипотезы о двух наиболее значимых факторах в числе основных, а также выявления их вклада в формирование ассоциаций химических элементов почвенного покрова на территории г. Несвижа. Пригодность данных для факторного анализа подтверждалась достаточным результатом теста Кайзера – Мейера – Олькина (Kaiser – Meyer – OlkinTest) (КМО) (0,66) и значимым уровнем теста сферичности Бартлетта (Bartlett'sTest) ($\chi^2 = 726$, $df = 53$, $p < 2,2e - 16$).

В результате были выделены две главные компоненты (главных фактора), на долю которых приходится более 80 % суммарной дисперсии, что демонстрирует матрица факторных нагрузок (табл. 4).

Таблица 4. Матрица значений факторных нагрузок главных компонент, описывающих более 80 % различий распределения элементов

Table 4. Matrix of values of factor loadings of the principal components that describe more than 80 % of the differences in the distribution of elements

Фактор/вклад, %	Ni	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn
1/62,3	0,97	0,83	0,65	–	0,34	0,33
2/18,0	–	0,31	0,34	0,56	0,94	0,77

П р и м е ч а н и е. Полужирным шрифтом выделены значения факторных нагрузок, существенно влияющих на формирование главных компонент

Первая главная компонента (фактор 1) отражает общую закономерность распределения элементов в почвенном покрове на территории г. Несвижа. Вторая главная компонента (фактор 2) уточняет общие закономерности с учетом особенностей распределения отдельных элементов.

Так, фактор 1, предоставляющий наибольший вклад в общую дисперсию (62,3 %), указывает на ассоциацию Ni – Cr – Cd. Данная ассоциация обусловлена преимущественно накоплением в почвенном покрове элементов, связанных с выбросами дорожного транспорта и передвижных источников.

Фактор 2 вносит 18 % в общую дисперсию и демонстрирует вторую ассоциацию Cu – Zn – Pb. Так же, как и первая, она имеет техногенное происхождение. Ответственность в формировании данной ассоциации лежит на непромышленных установках для сжигания в жилом фонде.

Графическое отображение матрицы факторных нагрузок первого (Dim 1) и второго (Dim 2) факторов представлено на рис. 5.

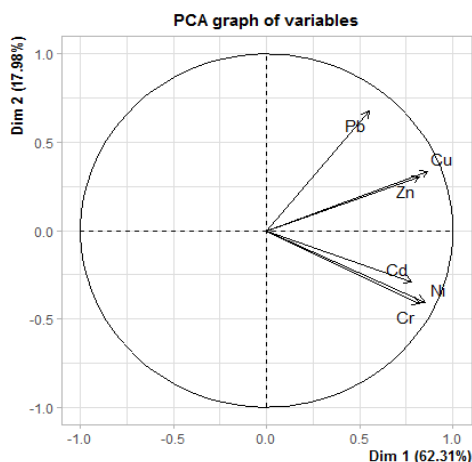


Рис. 5. Отображение химических элементов в пространстве двух факторов

Fig. 5. Display of chemical elements in the space of two factors

Данная иллюстрация наглядно представляет обе ассоциации. Если корреляционная матрица демонстрирует силу корреляционных связей между всеми исследуемыми ТМ в одном пространстве (рис. 4), то графическое отображение факторных нагрузок дает представление о качестве связей в пространстве двух факторов (рис. 5). Так, все компоненты первой ассоциации Ni – Cr – Cd характеризуются сильными связями между собой 0,65–0,97. Компоненты второй ассоциации Cu – Zn – Pb объединены как высокими 0,77–0,94 (Cu – Zn), так и средними связями 0,56 (Zn – Pb), что также согласуется с результатами корреляционного анализа, при этом обращает внимание на Pb, который, являясь частью второй ассоциации, демонстрирует «эксцентричное поведение».

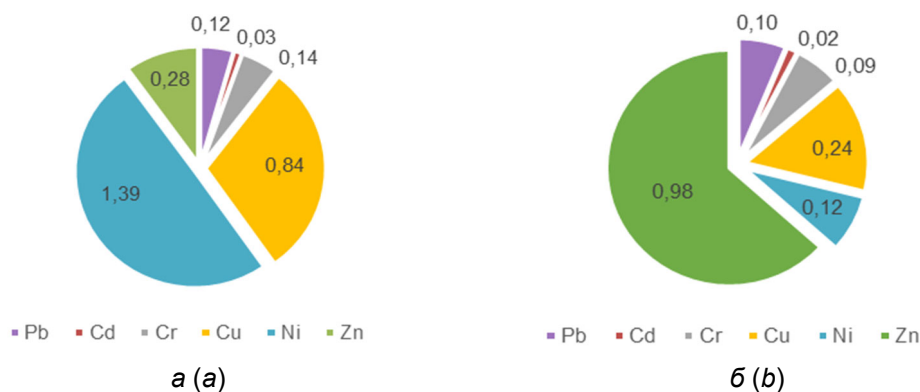


Рис. 6. Выбросы тяжелых металлов на территории Беларуси в 2018 г., т: а – от дорожного транспорта и других передвижных источников; б – от непромышленных установок в жилом фонде

Fig. 6. Emissions of heavy metals on the territory of Belarus in 2018, t: a – from road transport and other mobile sources; b – from non-industrial installations in the housing stock

Геохимический смысл выделения двух ассоциаций и обоснованность выводов подтверждают выбросы ТМ, приведенные на основании статистики, согласованной со временем почвенного опробования (рис. 6). Согласно рис. 6, а более 50 % от покомпонентного вклада приходится на долю Ni, образующего наиболее сильные корреляционные связи в ассоциации Ni – Cr – Cd. Общий вклад ТМ, поступающих от дорожного транспорта и, очевидно, участвующих в формировании указанной ассоциации составляет около 60 %.

Выбросы от непромышленных установок в жилом фонде являются важным фактором техногенного воздействия на почвенный покров г. Несвижа, формирующим вторую ассоциацию Cu – Zn – Pb (рис. 6, б). Общий вклад ТМ, поступающих от сжигания в жилом фонде, участвующих в формировании

данной ассоциации, составляет около 85 %. И хотя в настоящее время используется преимущественно газовое отопление, тем не менее длительное воздействие продуктов горения на почвенный покров города остается значимым фактором, формирующим актуальную техногенную нагрузку.

По результатам проведения факторного анализа были выполнены картосхемы, отображающие нагрузку отдельно по двум факторам (рис. 7).

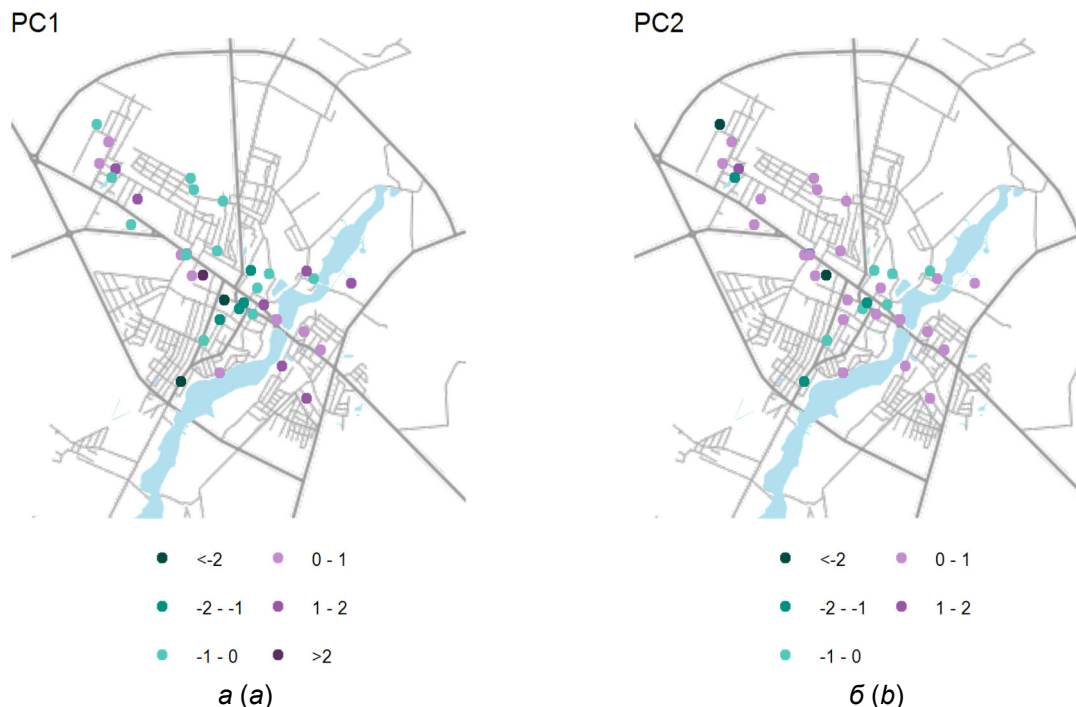


Рис. 7. Картосхемы распределения факторных нагрузок при формировании ассоциаций с учетом преобладающей роли выбросов: а – от дорожного транспорта и других передвижных источников (по фактору 1; Ni – Cr – Cd); б – от непромышленных установок в жилом фонде (по фактору 2; Cu – Zn – Pb)

Fig. 7. Maps of the distribution of factor loads in the formation of associations, taking into account the predominant role of emissions: a – from road transport and other mobile sources (by factor 1; Ni – Cr – Cd); b – from non-industrial installations in the housing stock (by factor 2; Cu – Zn – Pb)

При интерпретации полученных данных (см. рис. 7) отрицательные значения воспринимались как точки с низкой нагрузкой фактора, имеющие тенденцию к уменьшению (от 0 до ≤ -2), а также положительные – как точки с наиболее значимой нагрузкой, имеющие тенденцию к увеличению (от 0 до ≥ 2).

Таким образом, при использовании факторного анализа удалось не только выявить, но и оценить вклад каждого фактора в формирование нагрузки как для отдельно взятой точки, так и представить полученные результаты в пространстве города.

Радиальное распределение тяжелых металлов по профилю почвы изучалось на основании почвенных разрезов, заложенных в пределах общегородского центра. Результаты опробования почв представлены в табл. 5.

Заложенные почвенные шурфы позволяют составить представление о сложении центральной части города, представленными культурным слоем (ТСН), в значительной степени физически и химически загрязненным, сверху перекрытым насыпным горизонтом (РН). Поверхностный горизонт как шурфа 1, так и шурфа 2, демонстрирует распределение изучаемых компонентов согласно общегородским особенностям, установленным в ходе настоящего исследования. Если содержание Cu, Zn и Ni превышают значения регионального химического фона в 1,5–2,5 раза, то для Cr – в 3,0–4,0, Cd – в 5,0–5,5 раз и Pb – в 5,0–7,0 раз.

Данные табл. 5, помимо фактических содержаний, демонстрируют коэффициент концентрации K_k , рассчитанный на основании местного геохимического фона. Учитывая, что диапазон значений всей выборки находится на уровне 1,1–1,2 K_k , то сравнение с распределением K_k по глубине будет наиболее показательным.

Итак, согласно табл. 5, с глубиной распределение Ni, Cr и Cd изменяется незначительно и находится на уровне 0,7–1,4 К_к; коэффициент концентрации Cu увеличивается с глубиной от 1,1 до 5,4, достигая максимума на уровне 60–90 см от поверхности. Значение коэффициента для Zn варьирует от 0,9 до 9,6, с максимальными показателями в нижних слоях профиля. Pb отличается стабильно высокими значениями коэффициента по всей глубине.

Таблица 5. Радиальное распределение тяжелых металлов по профилю почвы

Table 5. Lateral distribution of heavy metals along the soil profile

Обозначение места заложения	Обозначение горизонта	Глубина отбора, см	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
Шурф-1	PN*	0–10	<u>7,18**</u> 0,8/0,4***	<u>20,00</u> 0,7/0,2	<u>32,84</u> 1,1/1,0	<u>9,60</u> 1,0/0,3	<u>57,35</u> 1,1/1,0	<u>0,77</u> 0,8/1,5
	TCH ₁	20–40	<u>10,18</u> 1,1/0,5	<u>23,46</u> 0,9/0,2	<u>170,04</u> 5,6/5,3	<u>23,33</u> 2,3/0,7	<u>84,05</u> 1,6/1,5	<u>1,09</u> 1,2/2,2
	TCH ₂	40–60	<u>11,63</u> 1,2/0,6	<u>31,15</u> 1,2/0,3	<u>95,00</u> 3,1/3,0	<u>32,86</u> 3,3/1,0	<u>86,50</u> 1,6/1,6	<u>1,00</u> 1,1/2,0
	TCH ₃	80–90	<u>11,69</u> 1,3/0,6	<u>32,69</u> 1,2/0,3	<u>87,00</u> 2,9/2,7	<u>54,08</u> 5,4/1,6	<u>85,74</u> 1,6/1,6	<u>1,21</u> 1,3/2,4
Шурф-2	PN	0–10	<u>6,60</u> 0,7/0,3	<u>17,50</u> 0,7/0,2	<u>20,68</u> 0,7/0,6	<u>7,40</u> 0,7/0,2	<u>36,45</u> 0,7/0,7	<u>0,72</u> 0,8/1,4
	TCH ₁	20–30	<u>10,36</u> 1,1/0,5	<u>29,26</u> 1,1/0,3	<u>64,00</u> 2,1/2,0	<u>11,51</u> 1,1/0,3	<u>49,20</u> 0,9/0,9	<u>0,94</u> 1,0/1,9
	TCH ₂	30–40	<u>11,63</u> 1,2/0,6	<u>18,13</u> 0,7/0,2	<u>351,14</u> 11,6/11,0	<u>32,86</u> 3,3/1,0	<u>154,96</u> 2,9/2,8	<u>1,20</u> 1,3/2,4
	TCH ₃	60–70	<u>10,42</u> 1,1/0,5	<u>22,59</u> 0,8/0,2	<u>142,39</u> 4,7/4,4	<u>36,93</u> 3,7/1,1	<u>510,74</u> 9,6/9,3	<u>1,29</u> 1,4/2,6
	TCH ₅	80–90	<u>10,30</u> 1,1/0,5	<u>19,06</u> 0,7/0,2	<u>79,00</u> 2,6/2,5	<u>24,71</u> 2,5/0,7	<u>85,28</u> 1,6/1,6	<u>0,97</u> 1,1/1,9

*Согласно [1].

**Содержание компонента, мг/кг.

***Кратность превышения местного геохимического фона/кратность превышения ПДК (ОДК).

Примечание. Полужирным шрифтом выделены концентрации ТМ, превышающие ПДК/ОДК.

Помимо высоких показателей коэффициента концентрации, отмечаются значительные превышения ПДК/ОДК для Pb – в 2,0–11,0 раза, а также Cd – в 1,9–2,6 раза. Содержания Zn и Cu находятся на уровне как ниже условных допустимых величин, так и значительно выше таковых – 0,9–9,3 и 0,3–1,6 соответственно.

Радиальное распределение ТМ по профилю почвы свидетельствует о значительном загрязнении [21]. Обращают на себя внимание высокие концентрации Pb, Zn и Cu, что позволяет сделать вывод о влиянии выбросов от непромышленных установок в жилом фонде, долгое время формирующих ассоциацию ТМ Cu – Zn – Pb (достоверно статистически установленную нами в рамках данного исследования), судя по всему, не только в отношении распределения нагрузок, касающихся поверхностного горизонта.

Выводы.

1. Коэффициенты концентраций, рассчитанные на основании средних содержаний компонентов в почвах городской среды г. Несвижа относительно регионального геохимического фона $C_{\text{рег}}$, сообщают об обогащении почв ТМ: Cd, Pb и Cr на уровне 5,5–6,6 К_к, содержание Ni, Zn и Cu более близко к фоновым значениям и составляет 2,0–2,8 К_к.

2. Коэффициент концентрации для максимальных значений $K_{\text{кmax}}$ свидетельствует о наиболее высоких значениях для Pb, превышающим фоновое значение более чем в 15 раз, а также Cd, Cr и Zn – в 9–10 раз, Cu и Ni – в 4–6 раз.

3. По сравнению с местным фоном $C_{\text{ф}}$ почвы города в среднем обогащены Zn – в 1,2 раза, Pb и Cu – в 1,1 раза. Содержание остальных элементов находится на уровне фоновых.

4. Монокомпонентные карты наглядно иллюстрируют однородность распределения Ni, Cr и Cd в выборке, подчиняющихся нормальному типу распределения, подтверждают низкую вариабельность значений, а также показывают относительно равномерность распределения данных компонентов в пространстве города согласно К_к: Ni в диапазоне 2,0–3,6, Cr – 3,1–8,8 Cd – 4,0–9,7. Рас-

пределение Cu, Zn и Pb, напротив, характеризует высокая вариабельность выборки и большая контрастность при логнормальном типе распределения данных выборок, согласно K_k : Cu – 1,2–6,1, Zn – 1,1–8,7, Pb – 3,8–15,6.

5. Результаты теста Краскела – Уоллиса (Kruskal – Wallis Test) свидетельствуют о том, что выборку данных на основании принадлежности точек к той или иной функциональной зоне характеризует распределение Ni, Pb и Cd как статистически недостоверное, а Cr, Cu и Zn – как достоверное.

6. На основании суммарного коэффициента загрязнения Z_c определено, что 18 % проб выборки относятся к незагрязненным, 72 % – к умеренно опасным и 10 % – к опасным. Согласно выполненной картосхеме пространственного распределения показателей Z_c можно проследить закономерность в распределении нагрузок: «центр – периферия», когда точки со значениями, соответствующими незагрязненным участкам, тяготеют к окраинам города, а показатели, соответствующие умеренно-опасному и опасному уровню загрязнения, – к центральной части города.

7. Корреляционный анализ указывает на наличие двух устойчивых ассоциаций коррелирующих между собой элементов, характеризующих почвенный покров исследуемого города: Ni – Cr – Cd и Cu – Zn – Pb, что явилось основанием о предположении в пользу существования двух значительных по своему воздействию факторов техногенного характера.

8. В результате проведения факторного анализа удалось подтвердить существование двух ассоциаций, установленных в ходе выполнения корреляционного анализа, а также выявить факторы и определить их вклад в формирование ассоциаций. Так, фактор 1 вносит 62,3 % в общую дисперсию и указывает на ассоциацию Ni – Cr – Cd, фактор 2 вкладывает 18 % в общую дисперсию и указывает на вторую ассоциацию Cu – Zn – Pb.

9. На основании приоритетности покомпонентного распределения ТМ, характеризующих выбросы от различных источников, а также совокупностей исследуемых ТМ, образующих ассоциации в почвах на территории г. Несвижа, научно установлено с высокой степенью вероятности, что оба фактора, ответственные за формирование ассоциаций – аэротехногенные: вклад фактора 1 обеспечивают выбросы ТМ от дорожного транспорта и других передвижных источников, фактора 2 – непромышленные установки в жилом фонде.

10. Картосхема распределения факторных нагрузок наглядно демонстрирует вклад отдельно взятого фактора в формирование нагрузки каждой точки. Так, распределение нагрузок от выбросов автотранспорта представлено более контрастно в диапазоне положительных и отрицательных значений, тяготеет к основным дорогам. Выбросы от непромышленных установок в жилом фонде, в свою очередь, формируют менее контрастную нагрузку, при этом имеют выраженное площадное распространение. Важно принять во внимание тот факт, что в г. Несвиже уже более 10 лет используется преимущественно газовое отопление, тем не менее эффект воздействия выбросов от сжигания топлива в жилом фонде сохраняется и остается значимым.

11. На основании изучения радиального распределения ТМ по профилю почвы сделан вывод о роли загрязненных грунтов в качестве третьего значимого фактора в формировании техногенной нагрузки на почвенный покров города.

12. Согласно непараметрическому дисперсионному анализу, принадлежность к той или иной функциональной зоне не оказывает влияния на распределение половины из числа исследуемых технофильных элементов (Ni, Pb, Cd). В свете этого факта появляется необходимость в поиске иного подхода в качестве основания для площадного отображения техногенных нагрузок в городах.

Таким образом, принадлежность исследуемого почвенного выдела (пробной площадки) к той или иной функциональной зоне может являться весьма условным основанием, указывающим на тип техногенной нагрузки и ее распределение, в то же время отрицать связь между функциональным использованием территории и характером нагрузки неправомерно. В свете этого выдвигается гипотеза о существовании типа городской почвы, которая формируется под воздействием определенных природно-техногенных факторов, что фактически отражается в строении профиля и указывает на определенный тип радиального распределения технофильных и других компонентов. Тогда совокупность таких типов в пространстве города позволит выявить особенности латерального распределения. Применение данного подхода позволит учесть как особенности поверхностных горизонтов, так и тип почвообразующих пород, в качестве которых в городе, наряду с естественными, нередко выступают загрязненные грунты и отходы, что в последствии может явиться основанием для системного представления о эволюции/инволюции городских почв как на уровне отдельно взятого типа почвы, так и на уровне совокупности типов, характеризующих почвенный покров города в целом.

Благодарности. Автор выражает благодарность за профессиональные консультации научному руководителю доктору географических наук В. С. Хомичу и кандидату геолого-минералогических наук С. В. Савченко, а также признательна кандидату географических наук О. Ю. Круковской

за помощь в интерпретации и представлении геохимических данных с использованием языка программирования R.

Acknowledgments. The author expresses his gratitude to the supervisor, Dr. Sc. (Geography) V. S. Khomich and Ph. D. (Geology and Mineralogy) S. V. Savchenko for the professional advices, and also thanks to Ph. D. (Geography) O. Yu. Krukowskaya for the help in interpreting and presenting geochemical data using the R programming language.

Список используемых источников

1. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация / М. И. Герасимова [и др.]. – Смоленск : Ойкумена, 2003. – 268 с.
2. Лукашев, В. К. Загрязнение тяжелыми металлами окружающей среды г. Минска / В. К. Лукашев, Л. В. Окунь // Минск : Институт геологических наук АН Беларуси, 1996. – 80 с.
3. Особенности загрязнения почв в различных функционально-планировочных зонах Минска / В. С. Хомич [и др.] // Природопользование. – 2009. – Вып. 16. – С. 71–81.
4. Светлогорск: экологический анализ города / В. С. Хомич [и др.]. – Минск : Минсктиппроект, 2002. – 216 с.
5. Хомич, В. С. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси / В. С. Хомич, С. В. Какарека, Т. И. Кухарчик ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т проблем использ. природ. ресурсов и экологии. – Минск : Минсктиппроект, 2004. – 259 с.
6. Научно-методические подходы к определению фоновых параметров содержания химических веществ в почвах Беларуси / С. В. Савченко [и др.] // Земля Беларуси. – 2019. – № 2. – С. 40–48.
7. Интегрированный подход при определении фоновых содержаний химических элементов в почвах / Г. О. Тепаносян [и др.] // Геохимия. – 2017. – № 6. – С. 563–570.
8. Зинкуте, Р. Факторный анализ при выделении ассоциаций и методические разработки подсчета геохимического фона / Р. Зинкуте // Природные ресурсы. – 1999. – № 4. – С. 97–108.
9. Иберла, К. Факторный анализ / К. Иберла ; пер. с нем. В. М. Ивановой. – М. : Статистика, 1980. – 398 с.
10. Многомерное отображение структуры региональных геохимических полей (факторный анализ) / А. В. Кирюшин [и др.] // Изв. РАН. Сер. геогр. – 1996. – № 4. – С. 24–45.
11. Тютюнник, Ю. Г. Факторный анализ геохимических особенностей почв городов Украины / Ю. Г. Тютюнник, Б. А. Горлицкий // Почвоведение. – 1998. – № 1. – С. 100–109.
12. Ассоциации химических элементов в природных компонентах на территории Березинского биосферного заповедника / О. В. Лукашев [и др.] // Природопользование. – 2014. – Вып. 25. – С. 115–123.
13. Лукашѐв, О. В. Ретроспективная оценка загрязнения почв и растительности г. Кобрин металлами / О. В. Лукашѐв, Н. В. Жуковская // Природные ресурсы. – 2009. – № 1. – С. 15–21.
14. Савельев, А. А. Использование языка R для статистической обработки данных / А. А. Савельев, С. С. Мухарамова, А. Г. Пилюгин // Казанский государственный университет, 2007. – 29 с.
15. Baize, D. (2001) Of the necessity of knowledge of the natural pedo-geochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements / D. Baize, T. Sterckeman // Science of the Total Environment. – Vol. 264, № 1–2. – P. 127–139.
16. Geochemical background levels of zinc, cadmium and mercury in anthropically influenced soils located in a semi-arid zone (SE, Spain) / C. Perez-Sirvent [et al.] // Geoderma. – 2009. – Vol. 148, no. 3–4. – P. 307–317.
17. Geochemical background in soil and till / A. N. Rencz [et al.] // Geological Survey of Canada. – Canada, 2006. – 64 p.
18. Саєт, Ю. Е. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Саєт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин. – М. : Недра, 1990. – 335 с.
19. Романкевич, Ю. А. Ретроспективная карта почвенного покрова г. Несвижа (Беларусь) для изучения трансформации городских почв / Ю. А. Романкевич // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXI Междунар. симп. им. акад. М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 130-летию со дня рожд. проф. М. И. Кучина / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – Т. I. – С. 812–813.
20. Смирнов, Б. И. Корреляционные методы при парагенетическом анализе / Б. И. Смирнов. – М., 1981. – С. 68.
21. Перельман, А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман, Н. С. Касимов. – М. : Астрель-2000, 1999. – 610 с.

References

1. Gerasimova M. I. *Antropogennye pochvy: genezis, geografiya, rekul'tivaciya* [Anthropogenic soils: genesis, geography, reclamation]. Smolensk, 2003, 268 p. (in Russian)
2. Lukashev V. K., Okun L. V. *Zagryazneniye tyazhelymi metallami okruzhayushchey sredy g. Minska* [Heavy metal pollution of the environment in Minsk]. Minsk, 1996, 80 p. (in Russian)
3. Khomich V. S., Kukharchik T. I., Kakareka S. V., Gorodetskiy D. Yu., Parfenov V. V., Ryzhikov V. A., Savchenko S. V., Samsonenko I. P. *Osobennosti zagryazneniya pochv v razlichnykh funktsionalno-planirovochnykh zonakh Minska* [Features of soil pollution in various functional and planning zones of Minsk]. *Prirodopolzovaniye = Nature Management*, 2009, no. 16, pp. 71–81. (in Russian)

4. Homich V. S. [et al.]. *Svetlogorsk: Ekologicheskij analiz goroda* [Svetlogorsk: Environmental analysis of the city], Minsk, 2002, p. 216. (in Russian)
5. Khomich V. S., Kakareka S. V., Kukharchik T. I., Kakareka S. V., Kukharchik T. I. *Ekogeokhimiya gorodskikh landshaftov Belarusi* [Ecogeochemistry of urban landscapes in Belarus]. Minsk, 2004, 259 p. (in Russian)
6. Savchenko S. V. *Nauchno-metodicheskiye podkhody k ustanovleniyu fonovykh parametrov sodержaniya khimicheskikh veshchestv v pochvakh Belarusi* [Scientific and methodological approaches to determining the background parameters of the content of chemicals in the soils of Belarus]. *Zemlya Belarusi = Land of Belarus*, 2019, no 2, pp. 40–48. (in Russian)
7. Tepanosyan G. O. [et al.] *Integrirovanny podkhod pri opredelenii fonovykh sodержaniy khimicheskikh elementov v pochvakh* [Integrated Approach to Determination of Background Contents of Chemical Elements in Soils]. *Geokhimiya = Geochemistry*, 2017, no. 6, pp. 563–570. (in Russian)
8. Zinkute R. *Faktornyy analiz pri vydelenii assotsiatsiy i metodicheskiye razrabotki podscheta geokhimicheskogo fona* [Factor analysis in identifying associations and methodological developments for calculating the geochemical background]. *Prirodnyye resursy = Natural resources*, 1999, no. 4, 97–108 p. (in Russian)
9. Iberla K. *Faktornyy analiz* [Factor analysis]. Moscow, 1980, 398 p. (in Russian)
10. *Mnogomernoye otobrazheniye struktury regionalnykh geokhimicheskikh poley (faktornyy analiz)* [Multidimensional mapping of the structure of regional geochemical fields (factorial analysis)]. *Izv. RAN. Ser. geogr. = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographic series*, 1996, no. 4, pp. 24–45. (in Russian)
11. Tyutyunnik Yu. G. *Faktornyy analiz geokhimicheskikh osobennostey pochv gorodov Ukrainy* [Factor analysis of geochemical features of soils in Ukrainian cities]. *Pochvovedeniye = Soil Science*, 1998, no. 1, pp. 100–109. (in Russian)
12. Lukashev O. V. *Assotsiatsii khimicheskikh elementov v prirodnnykh komponentakh na territorii Berezinskogo biosfernogo zapovednika* [Associations of chemical elements in natural components on the territory of the Berezinsky Biosphere Reserve]. *Prirodopolzovaniye = Nature Management*, 2014, no. 25, pp. 115–123. (in Russian)
13. Lukashev O. V., Zhukovskaya N.V. *Retrospektivnaya otsenka zagryazneniya pochv i rastitelnosti g. Kobrina metal-lami* [Retrospective assessment of contamination of soils and vegetation in the city of Kobrin with metals]. *Prir. Resursy = Natural Resources*, 2009, no. 1, pp. 15–21. (in Russian)
14. Savelyev A. A., Mukharamova C. C., Pilyugin A. G. *Ispolzovaniye yazyka R dlya statisticheskoy obrabotki dannykh* [Using the R Language for Statistical Data Processing]. Kazan', 2007, 29 p. (in Russian)
15. Baize D., Sterckeman T. Of the necessity of knowledge of the natural pedo-geochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements. *Science of the Total Environment*. 2001, vol. 264, no. 1–2, pp. 127–139.
16. Perez-Sirvent C., Martinez-Sanchez M. J., Garcia-Lorenzo M. L., Molina J., Tudela M. L. (2009) Geochemical background levels of zinc, cadmium and mercury in anthropically influenced soils located in a semi-arid zone (SE, Spain). *Geoderma* 148(3-4), 307–317.
17. Rencz A. N., Garrett R. G., Adcock S. W., Spirito W. A., Bonham-Carter G. F. (2006) Geochemical background in soil and till. Geological Survey of Canada. Canada, 64 p.
18. Sayet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, 1990, 335 p. (in Russian)
19. Romankevich Yu. A. *Retrospektivnaya karta pochvennogo pokrova g. Nesvizha (Belarus') dlya izucheniya transformatsii gorodskikh pochv* [A retrospective map of the soil cover of the city of Nesvizh (Belarus) for studying the transformation of urban soils]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy Mezhdunar. simpoz.* [Proc. of the int. symp. "Problems of geology and subsoil development"]. Tomsk, 2017, vol. 2, pp. 812–813. (in Russian)
20. Smirnov B. I. *Korrelatsionnyye metody pri parageneticheskoy analize* [Correlation methods in paragenetic analysis]. Moscow, 1981, 68 p. (in Russian)
21. Perelman A. I., Kasimov N. S. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, 1999, 610 p. (in Russian)

Информация об авторе

Романкевич Юлия Александровна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yulia_romankevich@mail.ru

Information about the author

Julia A. Ramankevich – Researcher, Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yulia_romankevich@mail.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-71-82>
УДК 911.375.227+528.85(476.1)

Поступила в редакцию 23.05.2022
Received 23.05.2022

ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОСНОВНЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КРУПНОГО ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ МИНСКА)

Л. А. Кравчук, А. А. Яновский, Н. М. Баженова

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Влияние растительного покрова на температуру подстилающей поверхности (LST) было изучено в основных типах геотехнических систем (ГТС) г. Минска (промышленные, коммунальные, жилые многоквартирные и усадебные, общественные, дорожные, спецтерритории и др.). Использовался сопряженный анализ дифференцированной географической информационной системы (ГИС) и данных дистанционного зондирования (ДЗ).

Для оценки растительного покрова применялись нормализованный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), индекс листовой поверхности (Leaf Area Index – LAI), содержание в пологе хлорофилла (Canopy chlorophyll content – CCC), степень озелененности (%).

Анализ установил значимые отрицательные связи LST с вегетационными индексами при сравнении всех типов территорий в городе (R^2 варьирует в пределах 0,42...0,45). Связи слабее в основных типах ГТС (производственно-коммунальных, жилых, общественных и др.). Коэффициенты детерминации LST с NDVI и степенью озелененности в производственно-коммунальных, общественных, жилых многоквартирных и усадебных ГТС оценены в 0,06 (0,31), 0,13 (0,25), 0,18 (0,27) и 0,28 (0,22) соответственно. Это свидетельствует о более значительном влиянии техногенных элементов застроенных территорий на LST.

Картографический анализ отличий средних значений LST ГТС и природных экосистем на городской территории от средних значений для соответствующих типов ГТС и природных комплексов выявил участки городской территории с повышенными или пониженными показателями LST. На большей части территории г. Минска различия средних показателей LST по типам ГТС и природных экосистем варьируют в пределах от $-3,0^\circ$ до $3,0^\circ$ в сторону увеличения или уменьшения. Однако в городе отмечены места с более высокими различиями. К наиболее теплым относятся в основном территории плотно застроенных промзон, отдельные участки жилой многоквартирной и общественной застройки, расположенные как в центральной части города, так и в новостройках на его окраинах. Для таких выделов характерна пониженная озелененность и низкое участие деревьев и кустарников. Отмечены также сравнительно более теплые участки природных комплексов (например, лесные и лесопарковые массивы), расположенные вблизи промзон или клиньями входящие в застроенную часть города, а также небольшие фрагментированные массивы леса и древесно-кустарниковой растительности. Сравнительно более холодные участки характерны для экосистем, приуроченных к долинам рек Свислочи и Лошицы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование; NDVI; LAI; LST; город; растительный покров; геотехническая система.

Для цитирования. Кравчук Л. А., Яновский А. А., Баженова Н. М. Дистанционная оценка влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности основных геотехнических систем крупного города (на примере Минска) // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 71–82.

REMOTE EVALUATION OF THE INFLUENCE OF VEGETATION COVER ON THE LAND SURFACE TEMPERATURE IN MAIN GEOTECHNICAL SYSTEMS OF THE LARGE CITY (BY THE EXAMPLE OF MINSK)

L. A. Kravchuk, A. A. Yanovskiy, N. M. Bazhenova

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

Abstract. The influence of vegetation cover on the Land Surface Temperature (LST) was studied in main types of geotechnical systems (GTS) in Minsk (industrial, municipal, residential multi-apartment and estate, public, road, special territories, etc.). A coupled analysis of a differentiated geographic information system (GIS) and Earth remote sensing data was used.

Vegetation cover was assessed using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Leaf Area Index (LAI), Canopy chlorophyll content (CCC), and greening degree (%).

The analysis revealed significant negative relationships between LST and vegetation indices when comparing all types of territories in the city (R^2 varies within 0.42...0.45). Connections are weaker in the main types of GTS. The coefficients of determination LST with NDVI and the greenery degree in industrial and communal, public, residential multi-apartment and estate GTS are estimated respectively at 0.06 (0.31), 0.13 (0.25), 0.18 (0.27), and 0.28 (0.22). This indicates a more significant effect of technogenic elements on LST.

Cartographic analysis of the differences between the average LST values in sections of various GTS and natural ecosystems in the urban area from the average values for the corresponding types of GTS and natural complexes revealed areas of the urban territory with increased or decreased LST values.

The differences for the GTS and natural ecosystems vary from -3.0° to $+3.0^\circ$ on the most of the territory of Minsk. However, areas with higher differences are noted in the city. The warmest areas are mainly territories of densely built-up industrial zones, separate areas of residential multi-apartment and public area, located in the historical center and in the new buildings on the outskirts of the city. They are characterized by a high density of buildings, hard surfaces, a low greenery degree and sparse of trees and shrubs.

Keywords: remote sensing; NDVI; LAI; LST; city; vegetation; geotechnical system.

For citation. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M. Remote evaluation of the influence of vegetation cover on the land surface temperature in main geotechnical systems of the large city (by the example of Minsk). *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 71–82.

Введение. Структура, пространственная организация и функционирование природных и геотехнических систем (ГТС) на урбанизированных территориях во многом определяют качество городской среды и комфортность проживания населения. Одними из направлений создания благоприятных для жизни городов, устойчивых к изменению климата и стихийным бедствиям, являются их экологически обоснованное планирование и регулирование вопросов природопользования с учетом поддержания эффективности выполнения компонентами природного комплекса (ПК) экосистемных функций.

Роль озелененных территорий в населенных пунктах актуализируется в связи с вопросами изменения климата. На законодательном уровне в новых строительных нормах Беларуси акцентировано внимание на климаторегулирующих функциях озелененных территорий в составе городов страны, где отмечено, что «озелененные территории населенных пунктов и пригородных зон предназначены для организации рекреационной деятельности и улучшения состояния окружающей среды, в том числе с учетом адаптации к изменению климата» [1].

Город является интегральной ГТС, созданной для комфортного проживания человека. Согласно географическим представлениям [2, с. 65] ГТС включает в себя одновременно (в качестве подсистем) элементы природы, а также различные технические объекты и комплексы технологических процессов.

В составе ГТС компоненты ПК в той или иной степени изменены (воздух, рельеф, почвы, водные объекты, растительность и др.). Относительно малоизмененные ПК, сохранившиеся в городах, и растительность в составе городских ГТС выступают в качестве компенсационного блока, нейтрализующего негативное воздействие техногенных объектов. В то же время ГТС оказывают влияние на функционирование природных и природоподобных экосистем в городах.

В составе урбанизированных территорий возможно выделить основные типы ГТС, такие как: промышленные и коммунальные территории; жилая многоэтажная, усадебная, общественная и смешанная застройка; специальные; транспортные (автомобильные и железные дороги, стоянки, парковки). Встречаются карьерно-отвалы, гидротехнические и мелиоративные сооружения (водохранилища, каналы) и др.

Учитывая сходство трансформации микроклиматических особенностей в различных ГТС и природных (или природоподобных) экосистемах, ранее в публикациях они рассматривались нами как соответствующие типы и виды климатопов [3, 4].

Знания об особенностях взаимодействия технической и природной составляющих ГТС, экосистемных функциях природного блока ГТС должны учитываться при проектировании городов.

Исследования вопросов эффективности функционирования растительного покрова в условиях городской среды, в том числе в аспекте изменения микроклиматических характеристик, осуществлялись ранее, в том числе и в Беларуси, с применением инструментальных наблюдений [5 и др.].

Дистанционные исследования городских тепловых аномалий достаточно активно проводятся в настоящее время во многих странах. Например, исследование сезонной динамики тепловых аномалий г. Москвы в инфракрасном диапазоне позволило определить соответствие между максимумами гистограмм яркостей снимков и годовым ходом температур, что дало возможность не учитывать сезонную разницу абсолютных температур, а также выявить связь тепловых зон с функциональным зонированием города [6].

Использование дистанционных оценок особенностей функционирования различных типов городских территорий дает возможность более детально оценить в них климаторегулирующую роль растительного покрова. Знания об особенностях взаимодействия технической и природной составляющих ГТС, экосистемных функциях природного блока ГТС должны учитываться при проектировании городских территорий.

Материалы и результаты исследований. Для целей оценки изменения температуры подстилающей поверхности (Land Surface Temperature – LST) в различных типах и видах ГТС и ПК города в зависимости от особенностей их растительного покрова использовался анализ ГИС-проекта крупнейшего города Беларуси – Минска. ГИС-проект дифференцирован в разрезе различных видов ГТС и природных (в том числе природоподобных) экосистем.

Для оценки связи показателей средней LST со средними значениями нормализованного разностного индекса растительности (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) [7], индекса листовой поверхности (*англ.* Leaf Area Index – LAI, m^2/m^2 , га/га), содержания в пологе хлорофилла (Canopy Chlorophyll Content – CCC, $\text{мкг}/\text{см}^2$) и степени озелененности в различных видах и типах ГТС использовались сведения о структуре и функциональной специфике городской застройки, особенностях природных и природно-антропогенных объектов на территории г. Минска. Идентификация типов и видов ГТС проводилась по данным земельной информационной системы Геопортала ЗИС УП «Проектный институт Белгипрозем» (www.gismap.by) и ведомственным материалам.

В ГИС-проекте г. Минска в разрезе кварталов застройки идентифицировались различные ГТС:

- производственные и коммунальные различных видов;
- жилые многоквартирные и усадебные высоко-, средне- и низкоплотные;
- общественные различных видов (административно-деловая, лечебно-оздоровительная, культурно-просветительская, научно-образовательная, спортивная, торгово-бытовая и др.).

К территориям ПК отнесены леса, лесо- и лугопарки, парки, древесно-кустарниковая (ДКР) и травянистая растительность на землях резерва. Всего на территории застроенной части г. Минска выделено 9 различных типов (производственные, коммунальные, дорожные, жилые многоквартирные, усадебные, общественные, специальные и др.) и 25 видов ГТС. К смешанным природно-техногенным геосистемам можно отнести сельскохозяйственные земли и малые ландшафтные формы.

Для оценки LST г. Минска взят снимок ASTER от 14.08.2017. В работе использован полученный на основе данного снимка продукт AST_08 v003 (ASTER L2 Surface Kinetic Temperature). При расчете AST_08 в качестве источника профилей температуры и влажности атмосферы выбран продукт MOD07_L2, значений содержания в атмосфере озона – Total Ozone Analysis using Solar Backscatter UltraViolet Version 2 (SBUV/2) и TOVS (TOAST)/Earth Probe-Total Ozone Mapping Spectrometer (EPTOMS). Для оценки содержания в атмосфере аэрозолей использованы данные глобальной модели аэрозолей Научно-исследовательской лаборатории BMC США (U. S. Naval Research Laboratory). Фильтрация отдельных мелких облаков (преимущественно над северной частью г. Минска) на полученном изображении выполнена путем подбора минимального значения температуры, которое содержится в каждом отдельном облаке с последующей пороговой обработкой, буферизацией ее результатов и исключением пикселей, попавших в полученную маску.

Для оценки связей LST с характеристиками растительного покрова в составе ГТС по данным ДЗ рассчитывали показатели, характеризующие растительный покров: NDVI, LAI, CCC, степень озелененности выдела анализа и картографирования.

Индексы NDVI, LAI и CCC рассчитывали по снимку спутника серии Sentinel-2 уровня обработки 1C с датой съемки 12.08.2017. Критерием выбора снимка являлись минимальная облачность (подбирали снимки без облаков и дымки) и приемлемый для оценки растительности период активной вегетации. Атмосферную коррекцию снимка выполняли с помощью программы обработки Sen2Cor [8].

CCC и LAI рассчитывали с помощью модуля «биофизический процессор» L2B (L2B biophysical processor) программы Sentinel-2 Toolbox [9]. Расчет LAI и CCC биофизическим процессором проводится на основе нейронных сетей. Обучающую выборку авторы модуля получили с помощью модели переноса излучения [9]. В частности, было выполнено моделирование отражательной способности полога для большинства типов и состояния растительности при условии регистрации излучения в спектральных диапазонах каналов Sentinel-2 при возможных значениях геометрии съемки [10].

LAI существенно нелинейно связан со значением коэффициента отражения растительности, поэтому его оценка по данным ДЗ зависит от значения масштаба. При оценке LAI по данным ДЗ предполагается случайное распределение листьев в пологе, а полученное значение LAI называется эффективным индексом листовой поверхности [11]. В целом LAI характеризует структуру растительности и коррелирует с фотосинтезирующей биомассой и чистой продукцией (приростом).

ССС является индикатором состояния растительности. Содержание хлорофилла может быть оценено как для отдельных листьев, так и для полога. Также СССР может быть рассчитано путем умножения содержания хлорофилла в листьях на LAI. Однако непосредственная оценка СССР является более робастной и точной.

Степень озелененности (%) территории той или иной ГТС определяли как отношение числа пикселей со значениями NDVI, соответствующими растительности, к общему числу пикселей в выделе.

Для ГТС дорожной инфраструктуры оценку связей LST с показателями растительного покрова не проводили, поскольку характерная ширина данных выделов меньше пространственного разрешения снимков, что существенно снижает точность оценок.

Предваряя анализ изменения показателей LST в различных типах ГТС в г. Минске в зависимости от избранных для анализа дистанционных характеристик растительного покрова в них, следует отметить основные особенности техногенного преобразования городских территорий и растительности [12].

В составе ГТС производственных и коммунальных территорий высока доля техногенно преобразованных участков – производственных зданий, сооружений, коммуникаций, технологических площадок, транспортной инфраструктуры. Помимо того, ряд промышленно-коммунальных объектов является источником эмиссий тепла, пара и загрязняющих веществ от технологических процессов. Насаждения обычно представлены небольшими массивами в санитарных разрывах, декоративными группами, аллеями или одиночными деревьями и кустарниками вблизи производственных зданий и сооружений, в местах отдыха. Нередко в составе данных ГТС встречается спонтанная ДКР и сорная травянистая растительность на неудобьях и нарушенных землях.

В ГТС жилой многоквартирной застройки природная основа существенно преобразована подземными техническими сооружениями, коммуникациями, многоэтажными жилыми зданиями, дорожками, проездами, бытовыми устройствами и элементами рекреационной инфраструктуры (игровыми, спортивными площадками и др.). В ее состав входят также насаждения, состоящие из небольших массивов, разреженных групп или одиночных деревьев и кустарников. Травянистый ярус, как правило, разрежен из-за рекреационных нагрузок, представлен преимущественно газонными травами, изредка – цветниками, систематически подвергается косью.

В жилой усадебной застройке ПК преобразован коммуникациями, зданиями и подсобными хозяйственными постройками, дорожками и площадками. Размер и состояние участков с овощными, плодовыми и декоративными культурами зависит от вида усадебной застройки и приемов ухода за ними.

В составе ГТС застроенных территорий общественного назначения ПК преобразуется коммуникациями, зданиями, сооружениями, дорожками и площадками с твердым покрытием, состав которых определяется видом общественных ГТС. Структура озелененных территорий также во многом определяется видом общественных ГТС и может варьировать от массивов ДКР до единичных деревьев и кустарников, партерных, спортивных или луговых газонов и цветников.

Структура и состояние всех компонентов ГТС детерминируют особенности LST, которая при всех равных метеоклиматических условиях в конечном итоге определяет особенности температурного режима атмосферного воздуха городской территории.

Оценка связи значений LST с различными показателями, характеризующими растительный покров и полученными по данным ДЗ для всей территории г. Минска, отражена на рис. 1. При этом анализировали показатели как для всех видов ГТС, так и для всех территорий ПК, расположенных в различных частях города.

К относительно малоизмененным территориям ПК в городе отнесены леса, лесо- и лугопарки, парки, массивы ДКР в поймах и на землях резерва. В них компоненты ПК относительно мало трансформированы. Например, в г. Минске большая часть лесных и лесопарковых сообществ сложена преимущественно средневозрастными высоко- и среднеполнотными сосновыми и смешанными лесами; ДКР на землях резерва в городе представлена ивняками, осинниками, березняками, черноольшаниками, а также невысоким участием других пород деревьев [12].

Как видно из рис. 1, наиболее сильные достоверные связи отмечаются между средними значениями LST и степенью озелененности участков городской территории различного уровня техногенного преобразования.

Значения LST и характеристики растительного покрова (NDVI, LAI, СССР, степень озелененности), полученные с использованием ДЗ в различных видах ГТС, приведены в таблице.

Производственные и коммунальные ГТС в Минске представлены разнородными объектами, от крупных промзон с плотной застройкой, развитой системой транспортных и промышленных коммуникаций, интенсивными технологическими процессами, до небольших производственных или коммунальных объектов с единичными зданиями или сооружениями или без них (полигоны отходов). При построении диаграмм производственные и коммунальные ГТС были объединены.

Данные ДЗ демонстрируют в производственно-коммунальных ГТС варьирование средних значений LST и вегетационных индексов в широком диапазоне. При выборке 215 производственных и коммунальных выделов в пределах г. Минска средние значения LST для них на момент съемки составляют $34,1^\circ$ и варьирует от $23,8^\circ$ до $39,5^\circ$. Вегетационные индексы, характеризующие качество растительного покрова, варьируют также в широких пределах, что обусловлено присутствием в составе данных ГТС как высоко возрастных продуктивных древостоев, так и разреженного, угнетенного травянистого покрова на нарушенных землях. Из таблицы видно, что показатели NDVI в данных ГТС изменяются от 0,46 до 0,74, при среднем значении для города 0,59. Показатели среднего LAI варьируют от 0,7 до 2,3, при среднем для города значении 1,1. Средние показатели концентрации ССС изменяются в пределах от 33 до 154 мкг/см^2 при среднем значении для данного типа ГТС в Минске близком к 51 мкг/см^2 . Степень озелененности ГТС данного типа в г. Минске составляет в среднем 16,5 %, при варьировании от 0,3 до 99,3 % на рекультивированном полигоне отходов Шабаны.

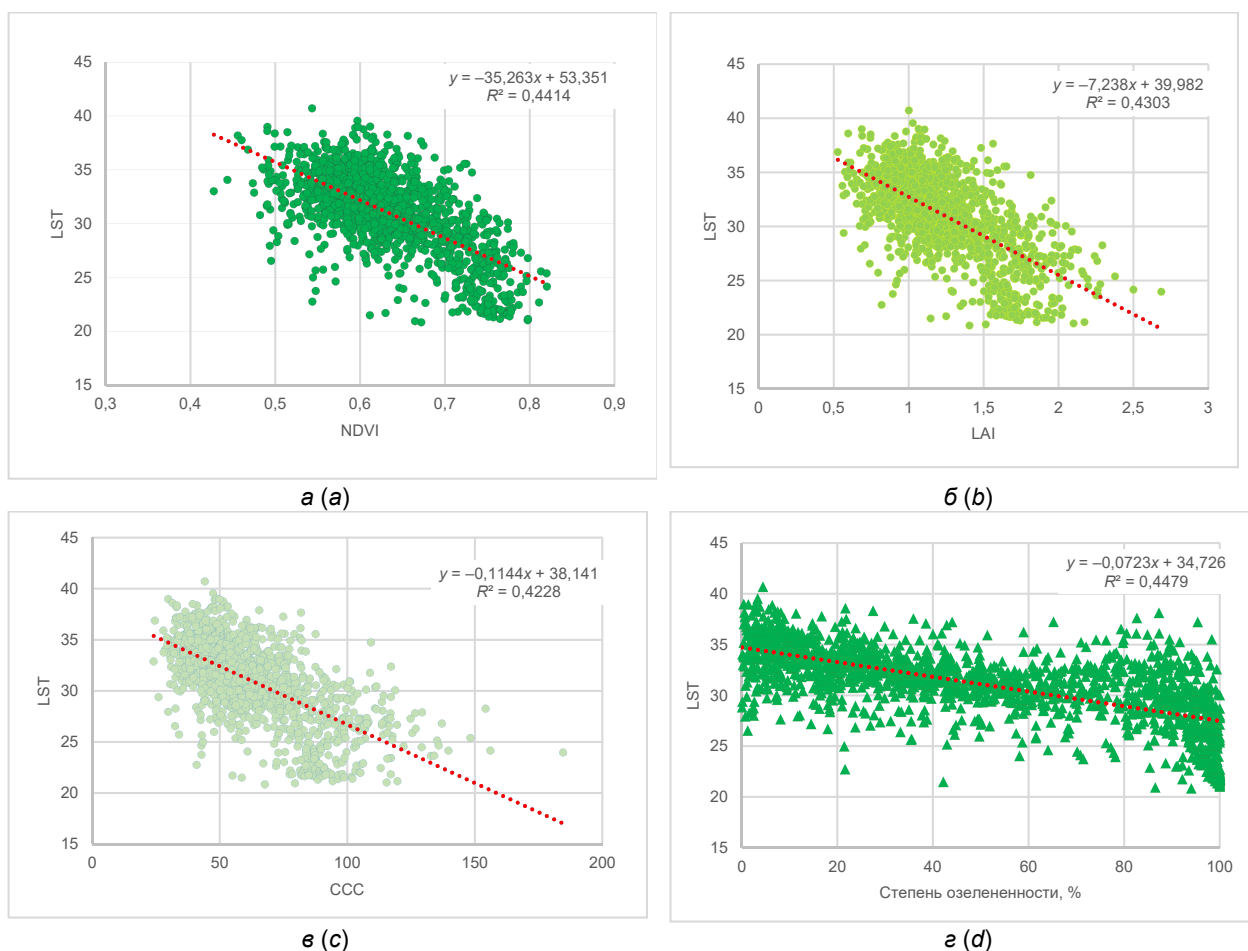


Рис. 1. Связь изменения LST_{avg} для всех выделов в г. Минске:

a – с нормализованным вегетационным индексом ($NDVI_{avg}$); **b** – с индексом листовой поверхности (LAI_{avg}); **в** – с концентрацией хлорофилла в пологе (CCC_{avg}); **г** – со степенью озелененности (%)

Fig. 1. Relationship between Land Surface Temperature (LST_{avg}) for all plots in Minsk:

a – with a Normalized Vegetation Index ($NDVI_{avg}$); **b** – with the Leaf Area Index (LAI_{avg}); **c** – with a Chlorophyll Concentration in the Canopy (CCC_{avg}); **d** – with greening degree (%)

Изменение LST, NDVI, LAI, CCC и степени озелененности (%) в различных видах геотехнических систем (ГТС) г. Минска (по данным ДЗ)

Changes of LST, NDVI, LAI, CCC and the greenery degree (%) in various types of geotechnical systems (GTS) in Minsk (according to remote sensing data)

Тип ГТС	Вид ГТС	Число выделов	LST avg min-max	NDVI avg min-max	LAI avg min-max	CCC avg min-max	O3, % avg min-max
ЖМ	ЖМв	252	31,6 24,1–36,7	0,61 0,50–0,71	1,1 0,6–1,7	56 31–103	38,8 1,5–76,5
	ЖМс	82	31,8 25,9–36,7	0,62 0,53–0,71	1,2 0,8–1,4	58 33–76	38,3 8,1–81,0
	ЖМн	29	31,3 27,3–35,1	0,61 0,53–0,74	1,1 0,8–1,7	56 31–90	39,4 1,0–81,2
	ЖУв	40	31,8 29,0–37,6	0,57 0,54–0,63	1,0 0,8–1,2	48 38–60	41,0 17–73,7
ЖУ	ЖУс	25	31,7 27,1–33,9	0,59 0,54–0,74	1,1 0,8–1,8	51 39–89	48,5 17,3–92,7
	ЖУн	69	30,7 25,2–36,8	0,62 0,53–0,73	1,2 0,9–1,6	60 38–90	63,6 20,5–99,6
	ИЦз	19	31,8 26,7–35,3	0,60 0,55–0,64	1,1 0,7–1,4	54 34–69	17,2 2,5–37,7
ИЦ	ИЦнз	6	32,3 29,8–34,5	0,60 0,58–0,62	1,1 1,0–1,2	54 47–59	18,6 10,7–30,3
	Оа-д	33	33,3 30,0–37,1	0,60 0,49–0,67	1,1 0,8–1,4	51 34–75	20,2 1,0–69,8
О	Ол-о	23	31,6 27,2–35,9	0,61 0,49–0,70	1,1 0,6–1,6	54 32–81	34,7 2,7–75,8
	Он-о	25	31,8 22,8–35,9	0,61 0,51–0,71	1,1 0,8–1,6	54 36–84	33,2 5,5–77,8
	От-б	34	34,7 28,0–40,7	0,54 0,43–0,63	0,8 0,5–1,2	40 24–53	6,9 0,1–30,1
	Оспорт	17	32,5 28,5–38,6	0,60 0,49–0,70	1,1 0,6–1,6	53 31–82	29,6 1,5–72,9
	Ок-п	14	31,1 21,5–35,7	0,60 0,48–0,65	1,1 0,6–1,3	52 29–73	39,9 4,0–92,3
	Осп	29	33,0 26,0–37,3	0,61 0,51–0,70	1,1 0,6–1,7	54 31–96	25,0 3,0–67,5
	П1	157	34,6 27,9–39,5	0,59 0,46–0,74	1,1 0,7–1,8	50 33–103	13,6 0,3–99,3
	П2	27	31,8 23,8–36,1	0,60 0,51–0,73	1,1 0,7–2,3	56 34–154	37,5 3,3–88,2
КС	КС	31	33,4 26,1–38,1	0,59 0,49–0,68	1,1 0,8–1,5	51 34–83	12,9 1,5–81,0
	ТР	3	33,8 32,6–35,0	0,58 0,56–0,59	1,0 1,0–1,1	47 44–50	11,3 7,0–19,5
ДОР	ДОР	3	34,3 32,5–37,2	0,56 0,50–0,61	0,9 0,7–1,0	42 33–48	10,3 3,1–19,7
	ДОРсп	12	32,3 25,0–34,1	0,57 0,50–0,62	0,9 0,7–1,0	40 29–49	11,5 2,8–24,2
	ДОРинф	4	32,7 29,4–34,8	0,53 0,50–0,55	0,7 0,6–0,9	34 26–43	11,8 0,1–22,9
	СП1	31	31,0 25,2–35,5	0,62 0,53–0,74	1,2 0,7–1,7	57 32–92	39,2 2,6–94
СП	СП2	6	27,2 21,8–32,3	0,71 0,63–0,77	1,5 1,1–2,1	81 58–114	85,7 64,9–100
	УЗ	41	31,8 26,7–37,2	0,59 0,47–0,75	1,0 0,6–1,8	51 28–95	27,0 0,1–98,6

Условные обозначения ГТС: ЖМв, ЖМс, ЖМн – жилые многоквартирные высоко-, средне- и низкоплотные соответственно; ЖУв, ЖУс, ЖУн – жилые усадебные высоко-, средне- и низкоплотные соответственно; ИЦз, ИЦнз – исторические центры с замкнутыми и незамкнутыми пространствами дворов соответственно; Оа-д, Ол-о, Он-о, От-б, Оспорт, Ок-п, Осп – общественные: административно-деловые, лечебно-оздоровительные, научно-образовательные, торгово-бытовые, спортивные, культурно-просветительные, специализированные и смешанные соответственно; П1, П2 – производственные: с незначительным и высоким участием насаждений соответственно; КС – коммунально-складские; ЖД – железнодорожные; ДОР – магистралей и улиц; ДОРсп – стоянок и парковок; ДОРинф – автозаправочные станции, депо и др.; СП1, СП2 – специального назначения: посольства, резиденции и др., полигоны, автодромы и др. соответственно; УЗ – участки незавершенного строительства; ОЗ – степень озелененности.

Как видно из рис. 2, в промышленно-коммунальных ГТС связь LST с NDVI отрицательная, но слабая, как и со степенью озелененности, но для последней коэффициент детерминации (R^2) составляет около 0,3. Слабые связи свидетельствуют о более существенном влиянии других факторов (техногенных сооружений, покрытий и технологических процессов) на средние значения LST в данных ГТС.

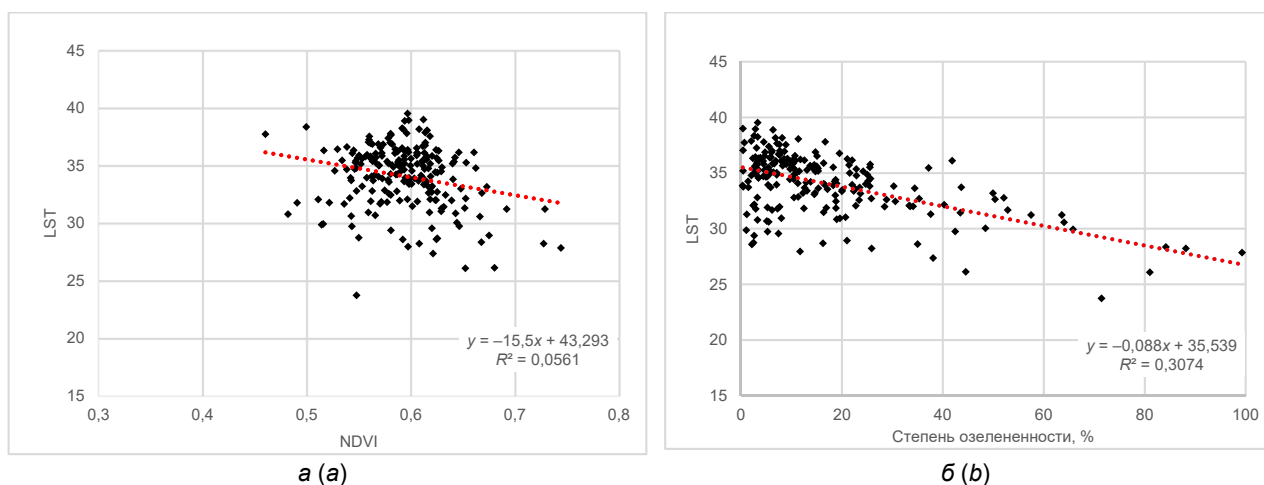


Рис. 2. Связь изменения LST в производственно-коммунальных ГТС в г. Минске:
а – с NDVI; б – со степенью озелененности (%)

Fig. 2. Relationship of LST change in industrial and municipal GTS in Minsk:
a – with NDVI; b – with the greenery degree (%)

ГТС жилой многоквартирной застройки на территории г. Минска сформированы в разные годы и отличаются по типам зданий и сооружений, их конфигурации, этажности и плотности застройки, степени развития сети проездов, парковок, площадок с искусственным покрытием, коммуникаций и других технических сооружений обслуживающей инфраструктуры. Различается и структура озелененных территорий в них, как по возрасту древесно-кустарникового яруса, его качественному составу и состоянию, так и по суммарной площади озелененных территорий.

В выборке из 363 выделов ГТС жилой многоквартирной застройки в пределах г. Минска средние значения LST составляют $31,6^{\circ}$ при варьировании от $24,1^{\circ}$ до $36,7^{\circ}$. Вегетационные индексы изменяются в пределах: NDVI – от 0,5 до 0,71 (среднее 0,61), LAI – от 0,6 до 1,7 (среднее 1,2), CCC – от 31 до 103 мкг/см^2 (среднее 57). Невысокие значения вегетационных индексов обусловлены участием в составе озелененных территорий данных ГТС, преимущественно разреженных групповых посадок деревьев, кустарников, высоко фрагментированных газонов, ослабленных в результате рекреационных нагрузок и техногенных воздействий. Степень озелененности составляет в среднем 38,8 % при варьировании от 1,0 до 81,2 %. Коэффициенты детерминации LST при оценке связи с NDVI и степенью озелененности составляют 0,18 и 0,27 соответственно (рис. 3).

Жилая усадебная застройка г. Минска занимает небольшие площади, сформирована в разные годы и отличается преимущественно размерами приусадебных участков и их обустройством. Здания и строения варьируют в этажности (1–3 этажа), отличаются материалами и конфигурацией. В составе озелененных территорий в коттеджной застройке преобладают высокодекоративные садово-парковые группы. В усадебной низкоплотной застройке сельского типа преобладают участки под огородными и плодовыми культурами.

В выборке из 135 выделов ГТС жилой усадебной застройки в пределах г. Минска средние значения LST составляют $31,2^{\circ}$ при варьировании от $25,2^{\circ}$ до $37,6^{\circ}$. Вегетационные индексы изменяются в пределах: NDVI – от 0,53 до 0,74 (среднее 0,60), LAI – от 0,8 до 1,8 (среднее 1,1), CCC – от 38 до 100 мкг/см^2 (среднее 53). Степень озелененности составляет в среднем 53,7 % при варьировании от 17,2 до 99,6 %. Коэффициенты детерминации LST с NDVI и степенью озелененности для ГТС усадебной застройки г. Минска оцениваются в 0,28 и 0,22 соответственно (рис. 4).

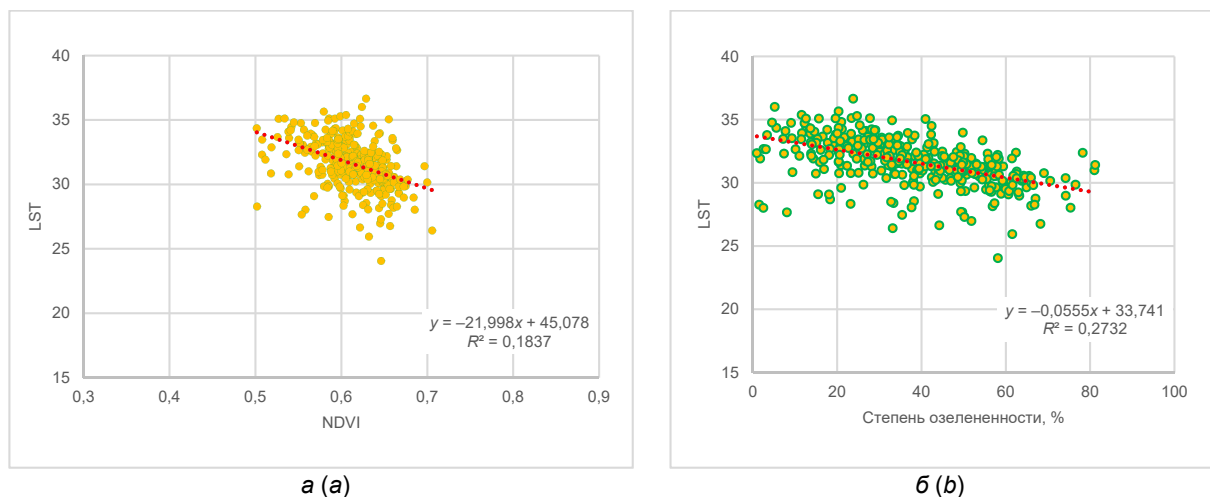


Рис. 3. Связь изменения LST для ГТС жилой многоквартирной застройки в г. Минске:
а – с NDVI; б – со степенью озелененности (%)

Fig. 3. Relationship of LST change for the GTS of residential multi-apartment buildings in Minsk:
a – with NDVI; b – with the greenery degree (%)

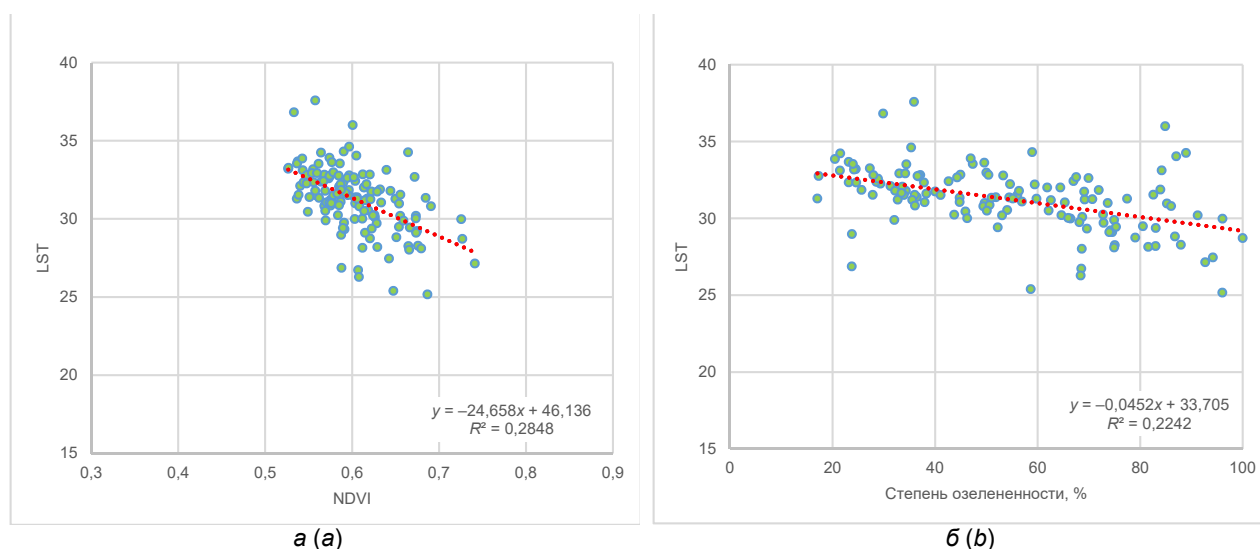


Рис. 4. Связь изменения LST для ГТС жилой усадебной застройки в г. Минске:
а – с NDVI; б – со степенью озелененности (%)

Fig. 4. Relationship of LST change for GTS of homestead in Minsk:
a – with NDVI; b – with the greenery degree (%)

Структура ГТС общественных территорий г. Минска весьма разнообразна и определяется их видом. В административно-деловых, например, встречаются единичные здания или их комплексы, высока доля поверхностей с твердым покрытием, насаждения составлены солитерами, небольшими декоративными группами деревьев и кустарников, фрагментированными партерными газонами и цветниками. В лечебно-оздоровительных и научно-образовательных ГТС застройка, как правило, представлена комплексами многоэтажных зданий и сооружениями. В составе насаждений встречаются как массивы деревьев, так и рядовые посадки кустарников, фрагментированные газоны. В спортивных ГТС высока доля площадок с покрытием, в том числе спортивными газонами. В выборке из 175 выделов в пределах г. Минска среднее значение LST в общественных ГТС составляет $32,8^\circ$ и варьирует от $21,5^\circ$ до $40,7^\circ$. Вегетационные индексы изменяются в пределах: NDVI – от 0,43 до 0,71 (среднее 0,59), LAI – от 0,5 до 1,7 (среднее 1,0), CCC – от 24 до 96 мг/см^2 (среднее 51). Степень озелененности ГТС общественной застройки г. Минска составляет в среднем 24,7 % при варьировании от 0,1 до 92,3 %. Коэффициенты детерминации при оценке связи LST с NDVI и степенью озелененности варьируют и оцениваются в 0,13 и 0,25 соответственно (рис. 5).

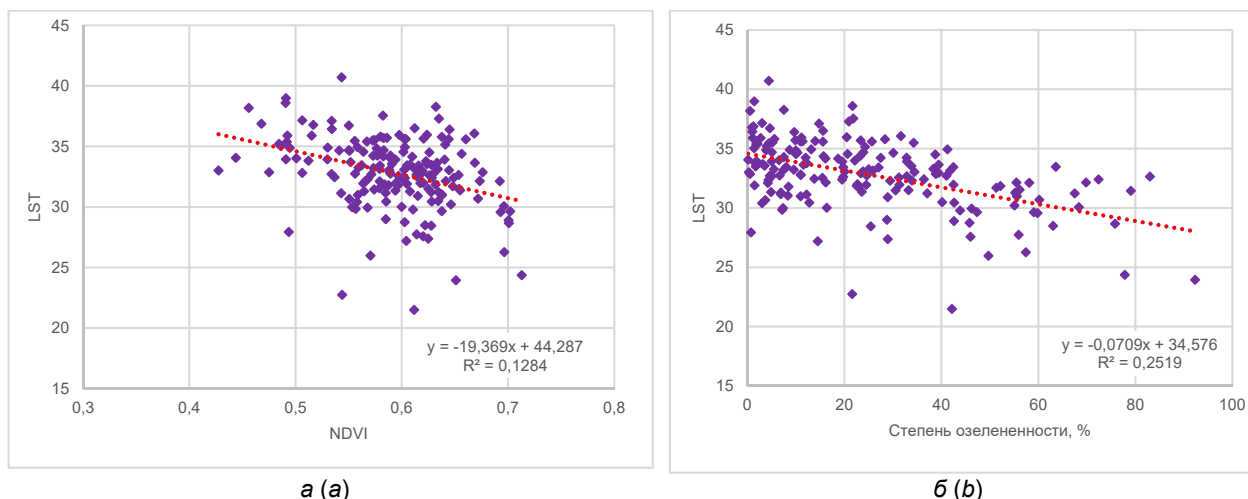


Рис. 5. Связь изменения LST для общественных ГТС в г. Минске:
а – с нормализованным вегетационным индексом (NDVI); б – со степенью озелененности (%)

Fig. 5. Relationship between LST changes for public GTS in Minsk:
a – with NDVI; b – with the greenery degree (%)

Сравнительный картографический анализ разницы LST_{avg} в выделах ГТС и ПК со средними значениями для типа ГТС в г. Минске позволил выявить территориальные особенности отличий.

На картосхеме (рис. 6) представлена разница между показателями LST_{avg} для каждого выдела того или иного типа и средними для города значениями LST для каждого типа ГТС и ПК. Как видно из данной картосхемы, на большей части города различия LST_{avg} по типам ГТС и ПК преимущественно варьируют в пределах от $-3,0^\circ$ до $+3,0^\circ$. Однако отмечаются участки и с более высокой разницей. Самые существенные отличия в сторону увеличения LST_{avg} характерны для крупных промышленных (МАЗ, МТЗ и др.), коммунальных (массивы гаражей), общественных торговых (гипермаркеты со стоянками) ГТС. Им, как правило, присущи низкая степень озелененности, высокая доля участков под зданиями, сооружениями и твердым покрытием, интенсивные эмиссии техногенного тепла. Следует подчеркнуть, что сравнительно низкие средние значения LST диагностируются на ТЭЦ 4. Это может быть обусловлено как постоянными эмиссиями водяных паров, так и сравнительно более высокой степенью озелененности, а также расположением за пределами плотной городской застройки.

В жилой многоквартирной застройке увеличение LST_{avg} , по сравнению со средними значениями для данного типа ГТС в г. Минске, отмечается как в центральной исторической части города, так и в микрорайонах, построенных (или уплотненных) в последние десятилетия (Каменная Горка, Лошица, Кунцевщина, Уручье, Сухарево, некоторые кварталы Малиновки и др.). На отдельных участках (например, в квартале по пр. Победителей напротив Дворца спорта) различия достигают более высоких значений. Такие показатели обусловлены как низкой степенью озелененности из-за высокой застроенности, так и разреженными, ослабленными или молодыми насаждениями.

Ниже среднего для данного типа ГТС отмечается LST_{avg} в жилых микрорайонах г. Минска с более высокими показателями степени озелененности, развитыми высоковозрастными зелеными массивами (Зеленый Луг, Юго-Запад, Серебрянка, Чижовка, жилая застройка вблизи ул. Глебки).

Сравнительно более высокими показателями LST_{avg} характеризуются также отдельные кварталы ГТС жилой усадебной застройки (Ангарская, Зацень, Цнянка и др.).

Анализ картосхемы на рис. 6 свидетельствует также о том, что и для природных экосистем показатели LST_{avg} выше средних отмечаются на отдельных участках лесов и лесопарков, расположенных вблизи промзон (лесопарк и парк 60-летия Октября вблизи МТЗ), а также клиньями входящих в состав городской застройки (некоторые кварталы лесопарка Степянка, Озерище, лесопарки Медвежино и в микрорайоне по ул. Ангарской) или на участках лесов, примыкающих к кольцевой автодороге. В отдельных массивах леса, расположенных на удалении от застройки на восточной окраине города, сравнительно более высокие значения LST_{avg} регистрируются в кварталах с разрушенными (ветровал) или изреженными древостоями, большими прогалинами, частыми тропами и дорогами. Это же характерно и для участков лесопарка вблизи Цнянского водохранилища с высоким участием прогалин и пляжных зон. Повышенные значения характерны и для небольших фрагментов лесов на сельхозугодьях.

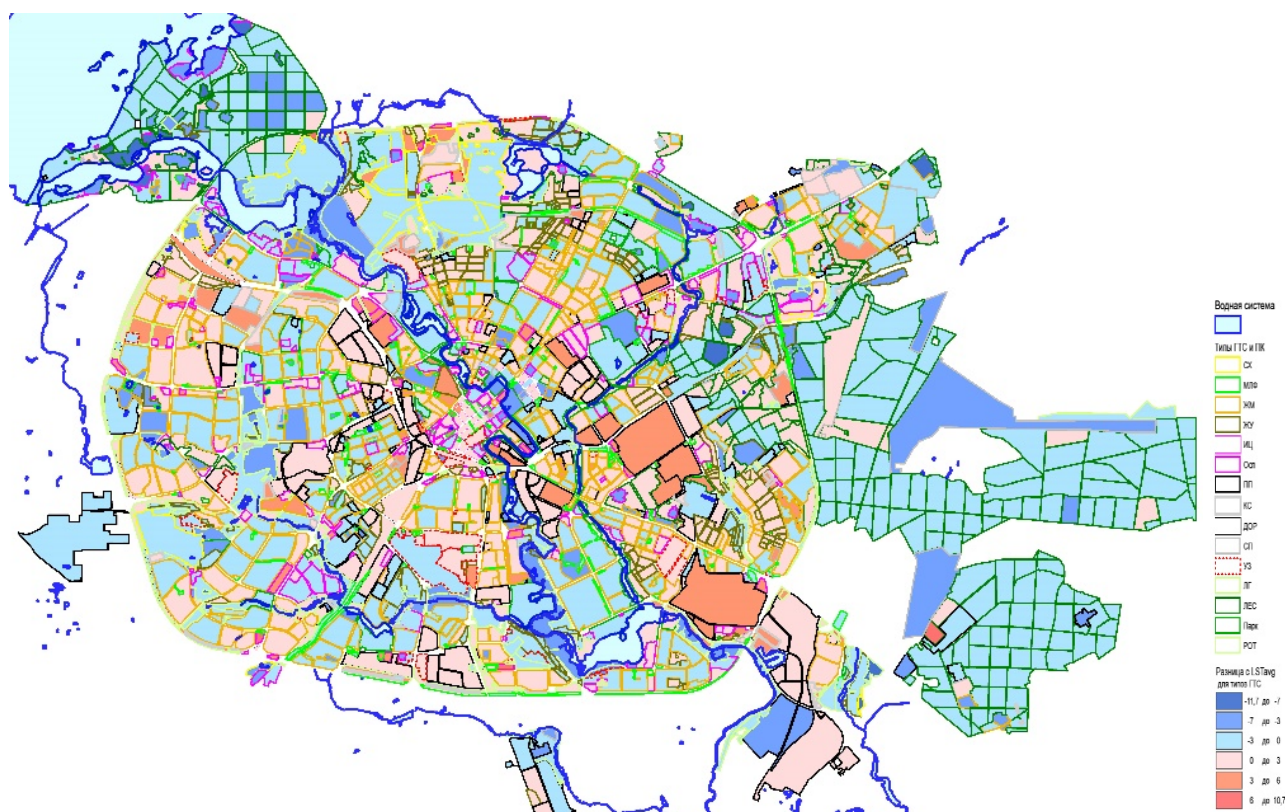


Рис. 6. Различия LST_{avg} в выделах от средних значений LST для соответствующих типов ГТС и естественных экосистем в г. Минске

Fig. 6. Differences of LST_{avg} in plots from the average LST values for relevant types of GTS structures and natural ecosystems in Minsk

На резервных территориях причинами превышения средних для города значений LST являются нарушения растительного покрова, отсутствие развитой ДКР, высокая доля троп и дорог.

Сравнительно низкие значения LST диагностируются в парках и на резервных территориях практически на всем протяжении долин рек Свислочи и Лошицы. Однако следует отметить увеличение LST_{avg} выше средних значений для парков в целом по городу и в парках вдоль Слепянской водной системы в частности, характеризующихся высоким участием дорожек и площадок, разреженными древостоями.

Заключение. Особенности изменения LST в зависимости от структуры и состояния растительного покрова в разрезе основных типов ГТС на территории г. Минска исследованы с использованием дифференцированной ГИС, сопряженной с данными ДЗ (LST, NDVI, LAI, CCC, степень озелененности).

Оценка связей LST с NDVI, LAI, CCC и со степенью озелененности всех выделов на территории г. Минска, включающих как ГТС, так и относительно малоизмененные территории ПК, показала отрицательные значимые связи (коэффициент детерминации оценивается в 0,44, 0,43, 0,42 и 0,45 соответственно).

Для участков ГТС различного типа связи LST с NDVI, LAI, CCC и со степенью озелененности также отрицательные, но слабее. Например, коэффициенты детерминации (R^2) LST с NDVI и степенью озелененности в производственно-коммунальных, общественных, жилых многоквартирных и усадебных ГТС оцениваются в 0,06 (0,31), 0,13 (0,25), 0,18 (0,27) и 0,28 (0,22) соответственно. Это свидетельствует о более значимом влиянии техногенных элементов в данных ГТС на LST.

Сравнение средних значений LST в выделах различной степени антропогенного преобразования на территории г. Минска со средними значениями этого показателя для соответствующих типов ГТС и ПК позволило выявить участки городской территории с повышенными или пониженными показателями. На большей части территории города различия средних показателей LST по типам ГТС и ПК варьируют в пределах $3,0^{\circ}$ в сторону увеличения или уменьшения. Однако в городе отмечаются участки и с более высокими различиями. К наиболее теплым относятся в основном ГТС плотно застроенных крупных промзон с интенсивными технологическими процессами, отдельные участки жилой многоквартирной и общественной застройки, расположенные как в центральной части города, так и на его

окраинах. Они характеризуются пониженной степенью озелененности и разреженными, молодыми древостоями. Выделяются также сравнительно более «теплые» участки ПК (например, лесные и лесопарковые массивы), расположенные вблизи промзон или клиньями входящие в застроенную часть города, а также небольшие фрагментированные массивы леса и ДКР. Для последних повышенные значения LST могут быть обусловлены сопоставимостью их размеров и пространственного разрешения снимков, в результате чего в пределах одного пикселя происходит усреднение кинетической температуры растительности и прилегающих техногенно преобразованных территорий.

Список использованных источников

1. Строительные нормы Республики Беларусь. Планировка и застройка населенных пунктов (СН 3.01.03-2020).
2. Географический энциклопедический словарь: понятия и термины / гл. ред. А. Ф. Трёшников. – М. : Советская энциклопедия, 1988. – 431 с.
3. Дифференцированная оценка зеленой инфраструктуры г. Минска с использованием данных дистанционного зондирования Земли / Л. А. Кравчук [и др.] // Природопользование. – 2019. – № 2. – С. 152–167.
4. Кравчук, Л. А. Средоформирующие функции зеленой инфраструктуры города Витебска / Л. А. Кравчук, Н. М. Баженова, А. Н. Гайшун // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 76–85.
5. Экологический мониторинг лесных ландшафтов Белоруссии / Е. А. Сидорович [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1988. – 206 с.
6. Балдина, Е. А. Исследование «теплового острова» Москвы по разносезонным снимкам Landsat 7/ETM+ / Е. А. Балдина, М. Ю. Грищенко // Геоинформатика. – 2011. – № 3. – С. 62–69.
7. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C. J. Tucker // Remote Sens. Environ. – 1979. – Vol. 8, iss. 2. – P. 127–150. – doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0
8. Sen2Cor 2.8 [Electronic resource]. – 2020. – Mode of access: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>. – Date of access: 21.10.2020.
9. Sentinel-2 Toolbox. [Electronic resource]. – 2020. – Mode of access: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox>. – Date of access: 21.10.2020.
10. Weiss, M. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 1.1) / M. Weiss, F. Baret. – 02.05.2016. – 53 p.
11. An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications / H. Fang [et al.] // Reviews of Geophysics. – 2019. – Vol. 57, iss. 3. – P. 739–799. – doi:10.1029/2018RG000608
12. Кравчук, Л.А. Структурно-функциональная организация ландшафтно-рекреационного комплекса в городах Беларуси / Л. А. Кравчук. – Минск : Беларуская навука, 2011. – 171 с.

References

1. *Stroitel'nye normy Respubliki Belarus' Planirovka i zastrojka naselennykh punktov* (SN 3.01.03-2020) [Building regulations of the Republic of Belarus "Planning and construction of settlements" (SN 3.01.03-2020)]. (in Russian)
2. Tryoshnikov A. F. *Geograficheskij enciklopedicheskij slovar': ponyatiya i terminy* [Geographical Encyclopedic dictionary: concepts and terms]. Moscow, 1988, 431 p. (in Russian)
3. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M., Pats A. Ch. *Differencirovannaya ocenka zelenoj infrastruktury g. Minska s ispol'zovaniem dannykh distancionnogo zondirovaniya Zemli* [Differentiated assessment of the green infrastructure of Minsk using the data of remote sensing of the Earth]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2019, no. 2, pp. 152–167. (in Russian)
4. Kravchuk L. A., Bazhenova N. M., Haishun A. N. *Sredoformiruyushchie funktsii zelenoj infrastruktury goroda Vitebska* [Environment-forming function of green infrastructure of Vitebsk]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 127–137. (in Russian)
5. Sidorovich E. A., Alekhno A. I., Bus'ko E. G. [et al.]. *Ekologicheskij monitoring lesnykh landshaftov Belorussii* [Ecological monitoring of forest landscapes of Belarus]. Minsk, 1988, 206 p. (in Russian)
6. Baldina E. A., Grishchenko M. Y. *Issledovanie «teplovogo ostrova» Moskvy po raznosezonnym snimkam Landsat 7/ETM+* [Investigation of the "thermal island" of Moscow using the Landsat 7 / ETM + multi-season images]. *Geoinformatika = Geoinformatics*, 2011, no. 3, pp. 62–69. (in Russian)
7. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 1979, Vol. 8, iss. 2, pp. 127–150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0
8. Sen2Cor. 2020. Available at: <https://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> (accessed 21 October 2020).
9. Sentinel-2 Toolbox. 2020. Available at: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox> (accessed 21 October 2020).
10. Weiss M., Baret F. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 1.1), 2016, 53 p.
11. Fang H. [et al.]. An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*, 2019, vol. 57, iss. 3, pp. 739–799. doi:10.1029/2018RG000608
12. Kravchuk L. A. *Strukturno-funkcional'naya organizatsiya landshaftno-rekreacionnogo kompleksa v gorodakh Belarusi* [Structural-functional organization of landscape-recreational complex is in the cities of Belarus]. Minsk, 2011, 171 p. (in Russian)

Информация об авторах

Кравчук Людмила Александровна – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kravchu-k@yandex.by

Яновский Александр Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanouski@yandex.ru

Баженова Наталья Михайловна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: nata.bazh@mail.ru

Information about the authors

Lyudmila A. Kravchuk – Ph. D. (Geography), Leader Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kravchu-k@yandex.by

Aleksander A. Yanovskiy – 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: yanouski@yandex.ru

Natalia M. Bazhenova – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: nata.bazh@mail.ru

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ *GEOLOGY. MINERALS*

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-83-90>
УДК 551.4.07[476.2+476.7]

Поступила в редакцию 15.04.2022
Received 15.04.2022

ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ЮЖНОЙ БЕЛАРУСИ В ЧЕТВЕРТИЧНОЕ ВРЕМЯ

А. В. Матвеев

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. На основании анализа разрезов буровых скважин, опубликованных материалов по палеогеографии и геологии региона построена серия палеогеоморфологических схем, выявлены основные факторы формирования на территории южной Беларуси крупной корытообразной формы земной поверхности и своеобразного «полесского» рельефа (ландшафта), который в близком к современному виде сформировался в муравинское межледниковье. Наиболее распространенными категориями рельефа были заболоченные озерно-аллювиальные и аллювиальные низины, которые с севера, запада и востока окаймлялись ледниковыми равнинами и возвышенностями припятского оледенения, а с юга – несколько тектонической приподнятой поверхностью Украинского Полесья. В послемуравинское время рельеф развивался унаследованно, происходило только некоторое изменение площадей распространения основных генетических типов за счет проявления аллювиальных и озерно-аллювиальных процессов.

Ключевые слова: палеорельеф; межледниковье; факторы формирования рельефа; «полесский» рельеф (ландшафт).

Для цитирования. Матвеев А. В. История формирования рельефа южной Беларуси в четвертичное время // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 83–90.

RELIEF FORMING HISTORY OF SOUTH BELARUS AREA DURING QUATERNARY PERIOD

A. V. Matveyev

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

Abstract. A series of paleogeomorphological schemes based on the analysis of borehole sections and published materials on paleogeography and geology of the region was constructed. The main formation factors of a large trough-shaped form of the earth's surface and a kind of "Polesie" relief (landscape) in southern Belarus were revealed. Its modern configuration was formed during the Muravian interglacial. Marshy lacustrine-alluvial and alluvial lowlands were the most common relief categories. They were bordered by glacial plains and highlands of the Pripyatian glaciation from the north, west and east, and by a slightly tectonically uplifted surface of the Ukrainian Polesie from the south. The relief was developing in a hereditary manner in the post-Muravian time. There were only some changes in the areas of the main genetic types' distribution due to the alluvial and lacustrine-alluvial processes.

Keywords: paleorelief; interglacial; relief formation factors; "Polesie" relief (landscape).

For citation. Matveyev A. V. Relief forming history of south Belarus area during quaternary period. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 83–90.

Южная часть Беларуси заметно отличается от других регионов страны широким распространением и разнообразием форм ледниковой, аквальной и эоловой аккумуляции, болот и заболоченных земель, песчаных равнин и низин (рис. 1). Все это вместе взятое образует своеобразный «полесский» рельеф (ландшафт), который исследовали многие специалисты [5–9, 12]. Однако никто специально не

рассматривал историю (время) возникновения этого своеобразного геоморфологического комплекса, который в настоящее время простирается широкой полосой от Польши через Беларусь в Россию. Именно это и стало одной из причин проведения специальных исследований по выявлению особенностей развития земной поверхности южной Беларуси, результатам которых и посвящена данная статья.

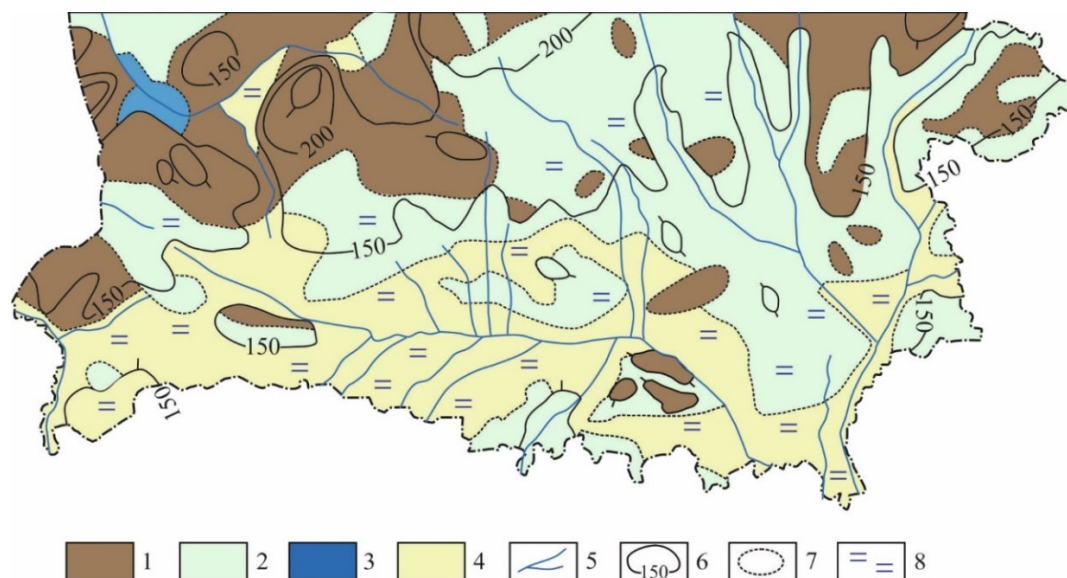


Рис. 1. Схема современного рельефа территории южной Беларуси:

- 1 – моренные равнины и краевые ледниковые образования;
2 – флювиогляциальные равнины (низины); 3 – озерно-ледниковые низины;
4 – озерно-аллювиальные и аллювиальные низины; 5 – речные долины; 6 – морфоизогипсы;
7 – границы распространения генетических типов рельефа; 8 – заболоченность

Fig. 1. Scheme of the modern relief of the southern Belarus area:

- 1 – moraine plains and marginal glacial formations; 2 – fluviglacial plains (lowlands);
3 – lacustrine-glacial lowlands; 4 – lacustrine-alluvial and alluvial lowlands; 5 – river valleys;
6 – morphoisohypses; 7 – boundaries of distribution of relief genetic types; 8 – waterlogging

Для реконструкции истории формирования земной поверхности южной Беларуси автором была построена серия схем палеорельефа для дочетвертичного этапа, брестского предледниковья, бело-вежского, александрийского и муравинского межледниковий. На этих схемах общий облик рельефа показан рисунком морфоизогипс, распространение основных генетических типов – обобщенными контурами, что не позволяет отразить определенную детальность в строении земной поверхности, но является достаточным для выявления общей направленности изменения земной поверхности.

Основой для построения схем палеорельефа послужили материалы бурения, которое проводилось в разные годы организациями ГП «НПЦ по геологии», опубликованные данные [3–7, 10–13] и результаты многолетних полевых работ автора. Обобщение этих данных свидетельствует, что в конце неогенового периода юг Беларуси представлял собой пологоволнистую равнину, наклоненную с юга на север от абсолютных отметок около 100 м и несколько выше до 50–0 м и ниже, наибольшие абсолютные отметки земной поверхности установлены в крайней северо-восточной части региона (до 150 м), а самые минимальные – в крайней северо-западной. Поверхность была сложена преимущественно меловыми (мел, мергель, песок) и палеоген-неогеновыми (пески, глины) породами (рис. 2), которые расчленялись сетью пологоврезанных достаточно широких ложбин [2]. По тальвегам этих понижений нередко протекали реки, располагались озера и болотные массивы. Выделить положение собственно рек из-за отсутствия достаточного фактического материала не представляется возможным, но, по мнению Г. И. Горецкого [5], в предчетвертичное время, несомненно, существовали долины Палео-Днепра и Палео-Немана и их наиболее крупных притоков. Помимо ложбин, неровности рельефа формировали пологие возвышенные участки длиной до 40–80 км при ширине 10–40 км, а на площадях распространения меловых пород – карстовые понижения. Проявления карста приводили к возникновению воронок глубиной 20–30 м, реже – до 60–90 м и площадью от сотен квадратных метров до 2 км² [1]. Однако уже в самом конце неогена эти воронки были в значительной степени заполнены песчано-глинистыми отложениями с пластами бурого угля и проявлялись в земной поверхности пологими понижениями глубиной до 5–10 м.

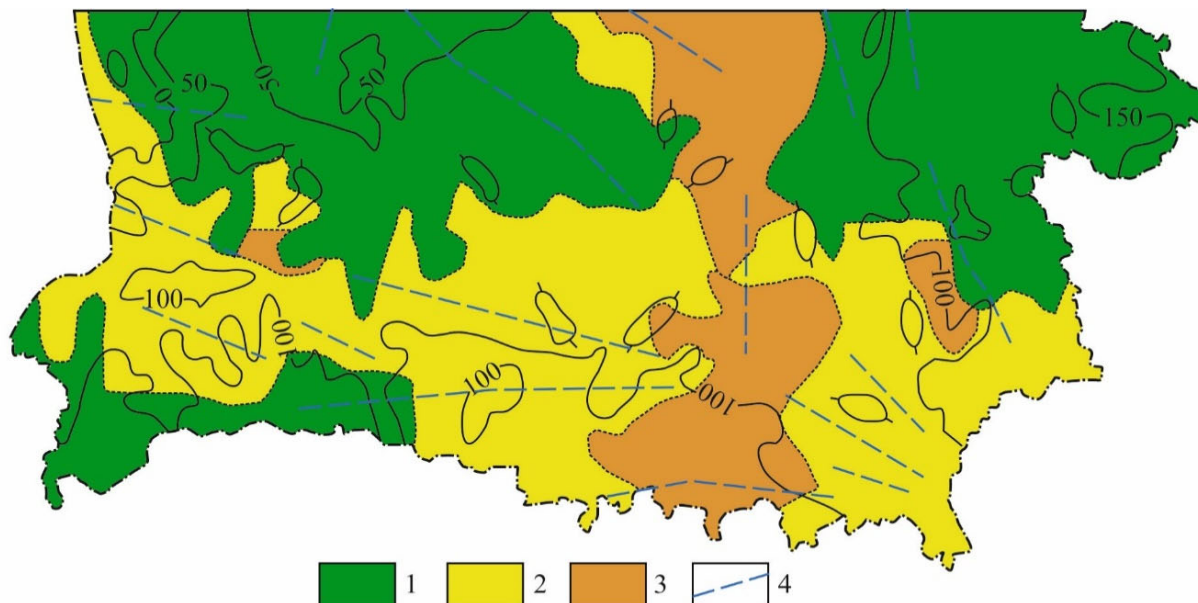


Рис. 2. Схема палеорельефа территории южной Беларуси (конец неогенового времени):
1 – пологоволнистая денудационная равнина, сложенная меловыми породами с локальными выходами в северо-западной части пород кристаллического фундамента;
2 – пологоволнистая равнина (низина), сложенная песчаными палеоген-неогеновыми отложениями с локальными участками меловых пород и неогеновых глин;
3 – плоская равнина (низина), сложенная неогеновыми глинами, с локальными участками меловых пород и палеоген-неогеновых песков; **4** – погребенные ложбины по [2].
 Остальные обозначения те же, что и на рис. 1

Fig. 2. Paleorelief scheme of the southern Belarus area (end of Neogene period):
1 – gently undulating denudation plain composed of Cretaceous sediments with local outcrops of the basement rocks in the northwestern part; **2** – gently undulating plain (lowland) composed of sandy Paleogene-Neogene sediments with local areas of Cretaceous rocks and Neogene clays;
3 – flat plain (lowland) composed of Neogene clays with local areas of Cretaceous rocks and Paleogene-Neogene sands; **4** – buried valleys [2].
 Other symbols are the same as in fig. 1

В раннечетвертичное время общие особенности рельефа описываемого региона мало изменялись: по-прежнему преобладали денудационные равнины, сложенные дочетвертичными породами, сохранялся и общий наклон земной поверхности с юга на север. Некоторые преобразования рельефа происходили за счет малоамплитудных тектонических движений и эрозионных процессов. Подобные особенности земной поверхности существовали вплоть до брестского времени. Поэтому палеогеоморфологическая схема этого этапа геоморфологической истории региона (рис. 3) может в определенной мере иллюстрировать и строение рельефа раннечетвертичного времени. Следует только иметь в виду, что распространение аккумулятивных и эрозионных процессов, очевидно, могло смещаться по площади. Однако детальнее охарактеризовать этот процесс не представляется возможным из-за весьма локального распространения изученных нижнечетвертичных отложений.

В брестское время на территории южной Беларуси под влиянием денудационных процессов и, в меньшей степени, тектонических движений произошло некоторое выполаживание поверхности и опускание ее в западной части региона. Характерные для предчетвертичного этапа относительно небольшие повышенные участки среди в целом выровненной поверхности уступили место более крупным по площади формам, но сократилось их общее количество, впервые появилось пологое поднятие на месте современной Мозырской возвышенности. Тектонические опускания в западной и локально – в центральной части предопределили проявление аккумулятивных процессов (озерно-аллювиальных, на отдельных площадях – болотных и озерных). Формировавшаяся аккумулятивная поверхность несколько напоминала современную в центральной части Полесья, однако существовали и определенные отличия. На земной поверхности преобладали алевриты и тонкие супеси (не пески, как сейчас), было меньше болот и фактически отсутствовало выраженное в современном рельефе понижение в центральной части региона.

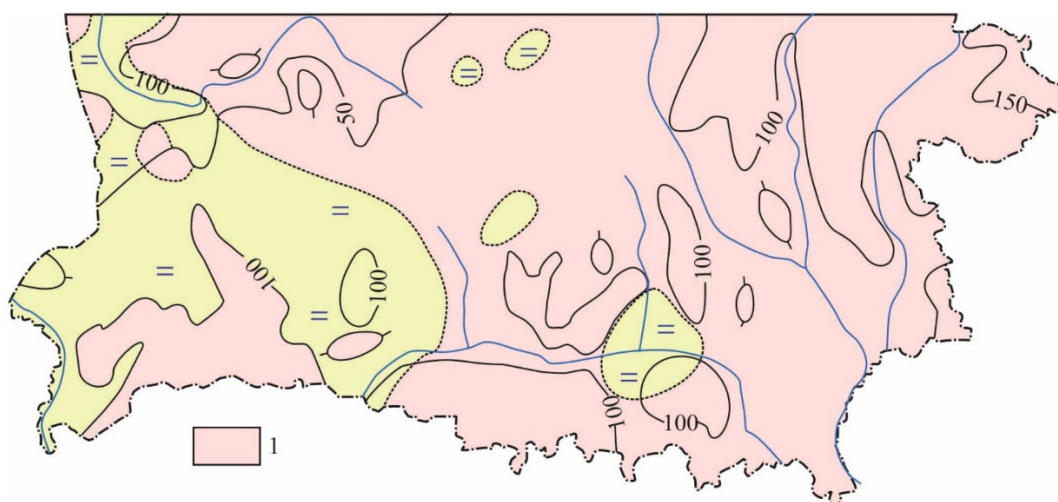


Рис. 3. Схема палеорельефа территории южной Беларуси (конец брестского времени):
1 – денудационная равнина (низина), сложенная дочетвертичными породами.
 Остальные обозначения те же, что и на рис. 1

Fig. 3. Paleorelief scheme of the southern Belarus area (end of Brest time):
1 – denudation plain (lowland) composed of pre-Quaternary rocks.
 Other symbols are the same as in fig. 1

По мнению Г. И. Горещкого [5] и В. А. Кузнецова [8], на территории Полесья в брестское время существовала достаточно густая речная сеть. Врез долин достигал 20–25 м и более. Было также много озерных водоемов, нередко значительных по площади, причем не только в западной части региона, но и восточнее. Например, обширный водоем возник на месте современной долины Припяти, в месте впадения в нее Тремли, Ипы и Птичи. Озерные котловины были разного генезиса: денудационные (в том числе карстовые), тектонические и старичные. Наиболее спорным является выделение котловин тектонического генезиса. Одним из факторов, позволяющих относить котловины к тектоническим, является повышенная мощность озерных отложений в случае отсутствия проявлений карстовых процессов. Примерно такие аргументы использовала в свое время и известный литовский геолог В. А. Чепулите [14], выделяя тектонические депрессии на территории Литвы и Беларуси в зоне отсутствия карстующихся меловых пород. Повышенные (до 30 м и более) толщи озерных брестских отложений выделены в современных районах Бреста, Добруша, Шерешево и др.

После брестского времени формирование рельефа южной Беларуси в значительной степени было предопределено распространением покровного наревского оледенения. Поэтому к последующему беловежскому межледниковью земная поверхность, по сравнению с предыдущими этапами, заметно изменилась (рис. 4). На большей части региона получили распространение ледниковые комплексы, заметно сократились площади денудационных равнин, сложенных дочетвертичными породами, и озерно-аллювиальных поверхностей. В частности, денудационные равнины сохранились на повышенных участках рельефа только в южной и восточной частях изученной территории, а наиболее крупные фрагменты озерно-аллювиальных поверхностей тяготели к долинам Палео-Припяти и Палео-Днепра. Наибольшие площади занимали пологоволнистые флювиогляциальные и, в меньшей степени, моренные равнины. На пониженных участках в северной части региона сформировались плоские озерно-ледниковые низины и равнины. Появились первые краевые ледниковые образования, в цоколе которых, как правило, располагались пологие поднятия добеловежского возраста.

Однако общий наклон земной поверхности с юга на север сохранился. Выделялась также серия пологих поднятий высотой более 100 м, которые были сложены в основном дочетвертичными породами и моренными отложениями. В целом возросла расчлененность рельефа, его генетическое разнообразие. Существовала серия крупных водотоков, положение которых унаследовано современным Днепром, Сожем, Неманом, Западным Бугом, Припятью и их притоками. Осадконакопление в беловежское время было локализовано в пределах озерных водоемов и относительно узких речных долин.

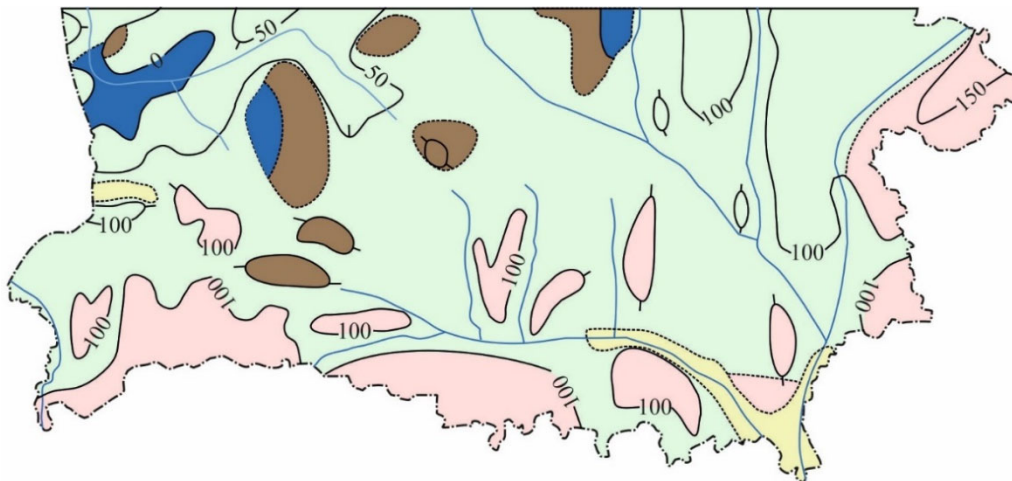


Рис. 4. Схема палеорельефа территории южной Беларуси в беловежское межледниковье.
Обозначения те же, что и на рис. 1, 3

Fig. 4. Paleorelief scheme of the southern Belarus area in the Belovezhian interglacial.
Symbols are the same as in fig. 1, 3

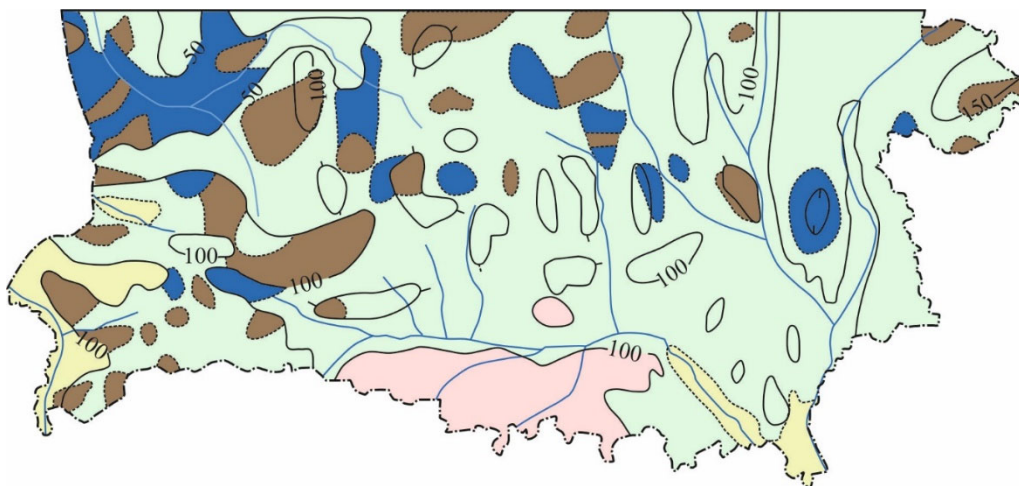


Рис. 5. Схема палеорельефа территории южной Беларуси в александрийское межледниковье.
Обозначения те же, что и на рис. 1, 3

Fig. 5. Paleorelief scheme of the southern Belarus area in the Alexandrian interglacial.
Symbols are the same as in fig. 1, 3

Последовавшее после беловежского межледниковья березинское оледенение перекрыло значительную часть территории Беларуси и существенно изменило рельеф характеризуемого региона. В александрийское межледниковье сильно сократились площади денудационных низин и равнин, но расширились ледниковые поверхности, менее выраженным стал наклон земной поверхности с юга на север и с востока на запад. В целом абсолютные высоты варьировали около 100 м, минимальные отметки (до 50 м и несколько ниже) тяготели к северо-западной части, но здесь произошло некоторое поднятие территории – практически исчезли высоты ниже уровня моря (рис. 5).

Из-за неравномерности ледниковой седиментации сформировалось довольно много неглубоких понижений, в которых при деградации ледника существовали приледниковые озера, а после дегляциации территории образовались озерно-ледниковые низины, причем их количество в александрийское межледниковье было максимальным за всю четвертичную историю юга Беларуси. Получила развитие довольно густая речная сеть, относившаяся к бассейнам Пра-Днепра, Пра-Немана и Пра-Сожа. Наиболее распространенным типом рельефа в александрийское межледниковье были пологоволнистые флювиогляциальные равнины, среди которых выделялись участки моренных равнин и краевых ледниковых образований, возвышавшиеся над флювиогляциальными поверхностями на 3–5 м и 10–20 м соответственно. В крайней юго-западной части региона и в долинах Припяти и Днепра на юго-востоке заметное распространение имели аллювиальные и озерно-аллювиальные низины.

По сравнению с предыдущим этапом еще больше возросла расчлененность рельефа. В центральной части региона выделялось довольно много относительно невысоких поднятий, сложенных флювиогляциальными и моренными отложениями.

После александрийского межледниковья вся территория Беларуси была перекрыта максимальным по площади распространения припятским оледенением. Поэтому в рельефе последующего муравинского межледниковья практически исчезли денудационные поверхности, сложенные дочетвертичными породами. Сохранились только их локальные фрагменты – преимущественно в юго-восточной части. Резко возросла расчлененность рельефа, колебание высот превысило 100–150 м, так как ледник сформировал краевые ледниковые возвышенности высотой до 250 м и более, которые расположены в основном в северной, западной и северо-восточной частях региона. Небольшие участки менее высоких краевых ледниковых образований появились и в центральной части изучаемой территории, исключением является только сформировавшаяся здесь Мозырская возвышенность, высоты в пределах которой заметно превышали современные 220 м. Наибольшие площади занимали, как и на предыдущих этапах, пологоволнистые флювиогляциальные поверхности. Произошло также общее поднятие территории, так как в александрийское время преобладали абсолютные отметки около 100 м, а в муравинское межледниковье такие высоты сохранились только в центральной части, вдоль долины Палео-Припяти. За счет возвышенностей на севере региона и несколько приподнятой крайней южной части в целом территория приобрела корытообразную форму, северный борт которой являлся зоной повышенной ледниковой аккумуляции, а южный борт был обусловлен тектоническими поднятиями Украинского кристаллического щита и Волынской моноклинали.

В наиболее пониженной части корытообразной формы рельефа в муравинское время происходило интенсивное накопление аллювиальных, озерно-аллювиальных и болотных отложений. Этому способствовали, кроме гипсометрического положения территории, избытки вод, поступавших при таянии ледника. Гидросеть региона практически не отличалась от современной.

Таким образом, в муравинское межледниковье завершилось формирование основных черт строения современной земной поверхности. Начиная с этого времени, рельеф территории юга Беларуси и Белорусского Полесья развивался унаследованно. Исчезли только локальные фрагменты денудационных равнин, сложенных дочетвертичными породами, и озерно-ледниковые низины. Сохранились основные генетические типы рельефа, отмечалось некоторое увеличение площадей аллювиальных и озерно-аллювиальных низин за счет размыва ранее образованных поверхностей. Например, оказались размытыми в послемуравинское время флювиогляциальные отложения в широкой полосе через населенные пункты дд. Дзержинск – Тонеж Лельчицкого района – г. Петриков, моренные равнины северо-западнее г. Лельчицы, восточнее г. Гомеля, озерно-аллювиальная низина – между г. Ганцевичи – оз. Выгоновское – д. Вулька Обровская Ивацевичского района и т. д. (рис. 6).

Кроме того, в послемуравинское время усилилось преобразование покровных отложений золовыми процессами, возросли площади болот и заболоченных земель, а на современном этапе активно проявляются техногенные рельефообразующие процессы.

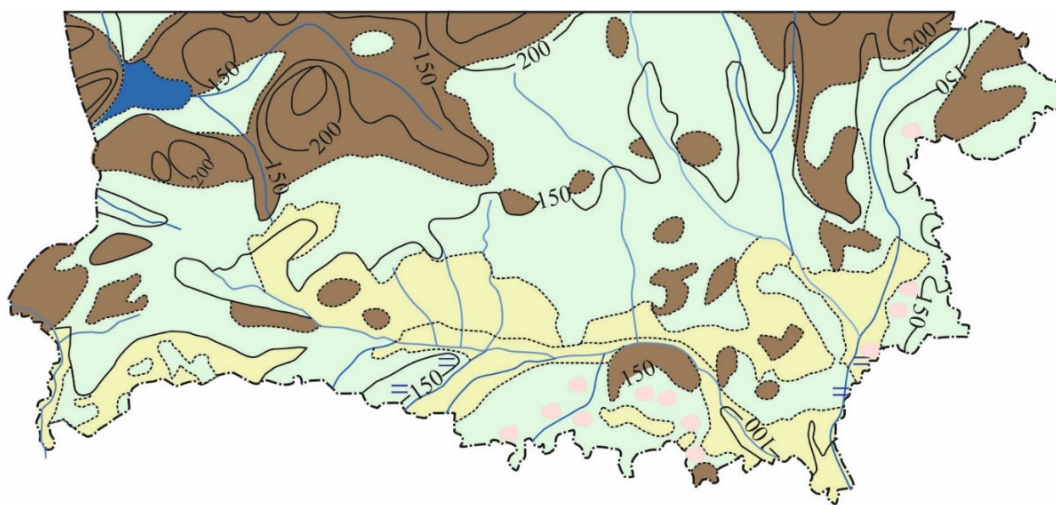


Рис. 6. Схема палеорельефа территории южной Беларуси в муравинское межледниковье. Обозначения те же, что и на рис. 1, 3

Fig. 6. Paleorelief scheme of the southern Belarus area in the Muravian interglacial. Symbols are the same as in fig. 1, 3

Выводы.

1. Основные особенности рельефа юга Беларуси сформировались в результате неравномерно проявлявшейся ледниковой рельефообразующей деятельности и тектонических процессов, что обусловило формирование крупной корытообразной формы земной поверхности.

2. Наиболее своеобразная часть земной поверхности юга Беларуси – «полесский» геоморфологический комплекс – сформировался в муравинское межледниковье.

3. В послемуравинское время развитие рельефа юга Беларуси происходило унаследованно, без существенных перестроек земной поверхности, отмечалось только некоторое изменение площадей распространения основных генетических типов рельефа при сохранении его генетического разнообразия.

Список использованных источников

1. Ажгиревич, Л. Ф. Буроугольная формация кайнозоя Белоруссии / Л. Ф. Ажгиревич. – Минск, 1981. – 200 с.
2. Ажгиревич, Л. Ф. Схематическая карта погребенных ложбин Белоруссии / Л. Ф. Ажгиревич, Л. С. Вольская, А. В. Матвеев // История формирования рельефа Белоруссии. – Минск, 1990. – С. 82.
3. Богдасаров, М. А. Геология и минералогия четвертичных отложений территории Подляско-Брестской впадины / М. А. Богдасаров. – Брест, 2011. – 166 с.
4. Геамарфалагічная карта. М 1 : 1 250 000 // Нацыянальны атлас Беларусі. – Мінск, 2002. – С. 66–67.
5. Горецкий, Г. И. Аллювиальная летопись великого Пра-Днепра / Г. И. Горецкий. – М., 1970. – 491 с.
6. Гречаник, Н. Ф. Рельеф территории Подляско-Брестской впадины / Н. Ф. Гречаник, А. В. Матвеев, М. А. Богдасаров. – Брест, 2013. – 154 с.
7. Крутоус, Э. А. Палеогеография антропогена Белорусского Полесья / Э. А. Крутоус. – Минск, 1990. – 141 с.
8. Кузнецов, В. А. Геохимия аллювиального литогенеза / В. А. Кузнецов. – Минск, 1973. – 280 с.
9. Матвеев, А. В. История формирования рельефа Белоруссии / А. В. Матвеев. – Минск, 1990. – 144 с.
10. Палеагеамарфалагічная карта. М 1 : 4 000 000 // Нацыянальны атлас Беларусі. – Мінск, 2002. – С. 68.
11. Палеогеография кайнозоя Беларуси / под ред. А. В. Матвеева. – Минск, 2002. – 164 с.
12. Рельеф Белорусского Полесья / под ред. Б. Н. Гурского. – Минск, 1982. – 131 с.
13. Цапенко, М. М. Антропогенные отложения Белоруссии / М. М. Цапенко, Н. А. Махнач. – Минск, 1959. – 225 с.
14. Чепулите, В. А. Анализ строения неогенпрегляциальных отложений юго-восточной Прибалтики по поверхности среза / В. А. Чепулите // История озер. – Вильнюс, 1970. – Т. 2. – С. 148–157.

References

1. Azhgirevich L. F. *Burougol'naya formaciya kajnozoya Belorussii* [Brown coal formation of the Cenozoic of Belarus]. Minsk, 1981, 200 p. (in Russian)
2. Azhgirevich L. F., Vol'skaya L. S., Matveev A. V. *Skhematicheskaya karta pogrebennyh lozhbin Belorussii* [Schematic map of buried hollows in Belarus]. *Istoriya formirovaniya rel'yefa Belorussii = History of the formation of the relief of Belarus*. Minsk, 1990, p. 82. (in Russian)
3. Bogdasarov M. A. *Geologiya i minerageniya chetvertichnyh otlozhenij territorii Podlyassko-Brestskoj vpadiny* [Geology and minerageny of Quaternary deposits of the territory of the Podlyassko-Brest depression]. Brest, 2011, 166 p. (in Russian)
4. *Geamarfalagichnaya karta* [Geomorphological map]. Scale 1 : 1 250 000. *Natsyyanal'ny atlas Belarusi = National Atlas of Belarus*. Minsk, 2002, pp. 66–67 (in Belarussian)
5. Goretskiy G. I. *Allyuvial'naya letopis' velikogo Pra-Dnepra* [Alluvial chronicle of the great Pra-Dnieper]. Moscow, 1970, 491 p. (in Russian)
6. Grechanik N. F., Matveev A. V., Bogdasarov M. A. *Rel'yef territorii Podlyassko-Brestskoy vpadiny* [The relief of the territory of the Podlaska-Brest depression]. Brest, 2013, 154 p. (in Russian)
7. Krutous E. A. *Paleogeografiya antropogena Belorusskogo Poles'ya* [Paleogeography of the Anthropogen of the Belarusian Polesye]. Minsk, 1990, 141 p. (in Russian)
8. Kuznecov V. A. *Geohimiya allyuvial'nogo litogeneza* [Geochemistry of alluvial lithogenesis]. Minsk, 1973, 280 p. (in Russian)
9. Matveev A. V. *Istoriya formirovaniya rel'yefa Belorussii* [The history of the relief formation of Belarus]. Minsk, 1990, 144 p. (in Russian)
10. *Paleageamarfalagichnaya karta* [Palaeogeomorphological map]. Scale 1 : 4 000 000. *Natsyyanal'ny atlas Belarusi = National Atlas of Belarus*. Minsk, 2002, p. 68 (in Belarussian)
11. *Paleogeografiya kajnozoya Belarusi* [Paleogeography of the Cenozoic of Belarus]. Ed. by A. V. Matveyev. Minsk, 2002, 164 p. (in Russian)
12. *Rel'ef Belorusskogo Poles'ya* [Relief of Belarusian Polesie]. Ed. by B. N. Gursky. Minsk, 1982, 131 p. (in Russian)

13. Capenko M. M., Mahnach N. A. *Antropogenovye otlozheniya Belorussii* [Anthropogenic deposits of Belarus]. Minsk, 1959, 225 p. (in Russian)
14. Chepulite V. A. *Analiz stroeniya neogenpreglyacial'nyh otlozhenij yugo-vostochnoj Pribaltiki po poverhnosti sreza* [Analysis of the structure of neogenetic preglacial deposits of the southeastern Baltic along the surface of the cut]. *Istoriya ozer = History of Lakes*. Vilnius, 1970, vol. 2, pp. 148–157. (in Russian)

Информация об авторе

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

Information about the author

Aleksey V. Matveyev – Academician, D. Sc. (Geological and Mineralogical), 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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-91-102>
УДК 553.97:528.88

Поступила в редакцию 17.03.2022
Received 7.03.2022

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БРЕСТСКОЙ, ГОМЕЛЬСКОЙ И МОГИЛЁВСКОЙ ОБЛАСТЕЙ БЕЛАРУСИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

И. И. Лиштван, Ю. Ю. Навоша, Н. И. Тановицкая, О. Н. Ратникова

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. На основе анализа спутниковых снимков высокого и сверхвысокого разрешения территорий торфяных месторождений Брестской, Гомельской и Могилёвской областей Республики Беларусь создана база данных участков торфяных месторождений, находящихся в ненарушенном состоянии (естественные торфяные болота); в нарушенном состоянии (участки с наличием мелиоративных систем, покрытые кустарниковой растительностью); осушенных участков с лесной растительностью; осушенных участков, эффективно используемых в сельском хозяйстве; разрабатываемых участков. Созданная в ГИС-формате база данных позволила оценить оставшиеся запасы торфа по каждому из месторождений, получить статистические данные о состоянии и направлениях использования площадей торфяных месторождений. При оценке оставшихся запасов учитывались потери торфа выработанных участков и при минерализации органического вещества на участках, используемых в сельском хозяйстве.

Всего проанализировано разведанных торфяных месторождений с площадью более 10 га в Брестской области – 469, в Гомельской области – 1290 и в Могилёвской области – 1385, общая площадь которых составляет 498,9; 530,8 и 221,0 тыс. га соответственно. По используемой при расчетах методике оставшиеся геологические запасы торфа составляют: в Брестской области – 772,3 млн т, в Гомельской области – 798,5 млн т и в Могилёвской области – 267,4 млн т.

Анализ спутниковых снимков территорий торфяных месторождений исследуемых областей показал, что в ненарушенном состоянии (естественные торфяные болота) находится от 30 до 37 % площадей торфяных месторождений. Основная часть (более 50 %) в Брестской и Гомельской областях – это осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования, в Могилёвской области – около 30 %. Во всех трех областях находится 141 месторождение с истощенными запасами торфа и 1457 месторождений (46 % от общего числа) с геологическими запасами менее 40 тыс. т (запасы, не представляющие интереса для комплексной переработки торфа).

Ключевые слова: торфяное месторождение; болото; торф; космическое зондирование.

Для цитирования. Лиштван И. И., Навоша Ю. Ю., Тановицкая Н. И., Ратникова О. Н. Оценка современного состояния торфяных месторождений Брестской, Гомельской и Могилёвской областей Беларуси на основе анализа спутниковых снимков // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 91–102.

ASSESSMENT OF THE CURRENT STATE OF PEAT DEPOSITS OF BREST, GOMEL AND MOGILEV REGIONS OF BELARUS BASED ON THE ANALYSIS OF SATELLITE IMAGES

I. I. Lishtvan, Yu. Yu. Navosha, N. I. Tanovitskaya, O. N. Ratnikova

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

Abstract. Based on the analysis of satellite images of high and ultra-high resolution of the territories of peat deposits of Brest, Gomel and Mogilev regions of the Republic of Belarus, a database of areas of peat deposits that are in an undisturbed state (natural peat wire); disturbed state (areas with the presence of reclamation systems covered with shrub vegetation); drained areas with forest vegetation; drained areas that are effectively used in agriculture; developed areas. The database created in the GIS format made it possible to estimate the remaining peat reserves for each of the deposits, to obtain statistical data on the state and directions of use of the areas of peat deposits. The estimation of the remaining reserves took into account the loss of peat from the depleted areas and the mineralization of organic matter at sites used in agriculture.

In total, explored peat deposits with an area of more than 10 hectares in Brest region – 469, in Gomel region – 1290 and in Mogilev region – 1385, the total area of which is 498.9, 530.8 and 221.0 thousand hectares respectively. According to the methodology used in the calculations, the remaining geological reserves of peat are: in Brest region – 772.3 million tons, in Gomel region – 798.5 million tons and in Mogilev region – 267.4 million tons.

Analysis of satellite images of the territories of peat deposits of the studied areas showed that from 30 to 37 % of the areas of peat deposits are in an undisturbed state (natural peat swamps). The main part (more than 50 %) in Brest and

Gomel regions is a drained land with peat soils of agricultural use, in Mogilev – about 30 %. In all three regions there are 141 deposits with depleted peat reserves and 1457 deposits (46 % of the total) with geological reserves of less than 40 thousand tons (reserves that are not of interest for integrated peat processing).

Keywords: peatland; bog; peat; space sensing.

For citation. Lishtvan I. I., Navosha Yu. Yu., Tanovitskaya N. I., Ratnikova O. N. Assessment of the current state of peat deposits of Brest, Gomel and Mogilev regions of Belarus based on the analysis of satellite images. Nature Management, 2022, no. 1, pp. 91–102.

Введение. В рамках задания «Выполнить анализ современного состояния торфяных месторождений на основе данных дистанционного зондирования Земли и разработать атлас торфяных месторождений Республики Беларусь» ГНТП «Природопользование и экологические риски» на 2016–2020 годы подпрограммы 01 «Рациональное природопользование и инновационные технологии глубокой переработки природных ресурсов» на основании инвентаризации и оценки современного состояния территории торфяных месторождений Брестской, Гомельской и Могилёвской областей по спутниковым снимкам и разработки базы данных выполнен анализ состояния торфяных месторождений Брестской, Гомельской и Могилёвской областей Беларуси.

Основная часть. Для анализа состояния территории торфяных месторождений в зависимости от фактического состояния и вида использования в хозяйственной и иной деятельности были выделены следующие категории участков торфяных месторождений, которые можно определить путем дешифрирования спутниковых снимков:

- естественное торфяное болото (ненарушенное торфяное месторождение);
- нарушенное торфяное болото с кустарниковой растительностью;
- торфяное месторождение, покрытое лесной растительностью;
- осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования;
- разрабатываемый участок.

Естественные болота сохраняются в естественном ненарушенном состоянии. Допускается ограниченное использование естественных болот для осуществления отдельных видов хозяйственной и иной деятельности, не оказывающих вредного воздействия на болотные экологические системы (ведение лесного хозяйства, экологический туризм, сбор, заготовка дикорастущих растений и (или) их частей, сенокошение, ведение охотничьего хозяйства и охота, ведение рыболовного хозяйства и рыболовство и др.), при условии соблюдения режима охраны и использования естественных болот.

Нарушенные болота (покрытые древесно-кустарниковой растительностью) используются для ведения лесного хозяйства, сбора, заготовки дикорастущих растений и (или) их частей, сенокошения, ведения охотничьего хозяйства и охоты, ведения рыболовного хозяйства и рыболовства, осуществления других видов хозяйственной и иной деятельности.

Осушенные земли с торфяными почвами используются для ведения сельского хозяйства.

Разрабатываемые участки являются участками, используемыми для добычи торфа для нужд топливно-энергетического сектора экономики и для производства грунтов различного назначения, удобрений, гуминовых препаратов, особо ценных видов торфа (верхового малоразложившегося торфа для гидролизного производства, битуминозного торфа для битумного производства, торфа, пригодного для использования в качестве сырья для лечебных целей). Учитывая относительно небольшие площади реально разрабатываемых участков (менее 0,2 %) и их высокую изменчивость во времени эти участки были отнесены к категории нарушенных участков.

Предложенные категории участков состояния торфяных месторождений качественно отличаются способом использования ресурсов торфяного месторождения и позволяют количественно оценить изменение геологических запасов торфа, общее состояние торфяного фонда Республики Беларусь.

Всего в Брестской, Гомельской и Могилёвской областях Беларуси находится 3144 разведанных торфяных месторождений площадью более 10 га, общая площадь которых составляет ~1250,7 тыс. га, или 12 % территории указанных областей с геологическими запасами торфа ~1,84 млрд т (табл. 1).

Наиболее широко торфяные месторождения представлены в Брестской области, площадь которых составляет 498,9 тыс. га, или 15,2 % территории области. Процентное соотношение площади торфяных месторождений Гомельской области (530,8 тыс. га) к площади области составляет 13,1 %. Могилёвская область характеризуется наибольшим количеством торфяных месторождений (1385) при относительно небольшой их общей площади – 221,0 тыс. га, что составляет 7,6 % территории области.

Общая площадь ненарушенных торфяных месторождений трех областей республики, составляет 426,3 тыс. га, нарушенных торфяных болот – 190,0 тыс., торфяных месторождений, покрытых лесной растительностью – 35,2 тыс., осушенных земель с торфяными почвами сельскохозяйственного использования – 599,1 тыс. га.

Таблица 1. Распределение площадей торфяных месторождений по Брестской, Гомельской и Могилёвской областям**Table 1. Distribution of areas of peat deposits in the Brest, Gomel and Mogilev regions**

Область	Количество торфяных месторождений, шт.	Площадь торфяных месторождений, тыс. га	Площадь области, тыс. га	Площадь участков торфяных месторождений, выбывших из промышленной эксплуатации, тыс. га	Процентное соотношение площади торфяных месторождений к площади области, %
Брестская	469	498,9	3280	38,8	15,2
Гомельская	1290	530,8	4040	54,2	13,1
Могилёвская	1385	221,0	2910	37,0	7,6

Результаты анализа состояния территорий торфяных месторождений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Распределение площадей торфяных месторождений по категориям современного состояния (по областям)**Table 2. Distribution of areas of peat deposits by categories of current state (by regions)**

Область	Категория участков			
	Естественное торфяное болото (ненарушенное торфяное месторождение) (участки), тыс. га / %	Нарушенные торфяные месторождения (участки), тыс. га / %	Торфяные месторождения (участки), покрытые лесной растительностью, тыс. га / %	Осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования, площадь, тыс. га / %
Брестская	183,6 / 36,8	47,1 / 9,4	4,0 / 0,8	264,2 / 53,0
Гомельская	160,7 / 30,3	85,3 / 16,1	14,8 / 2,8	270,0 / 50,8
Могилёвская	82,0 / 37,1	57,6 / 26,1	16,4 / 7,4	64,9 / 29,4
<i>Всего</i>	426,3	190,0	35,2	599,1

На рис. 1 приведены диаграммы распределения площадей торфяных месторождений по категориям современного состояния.

**Рис. 1. Распределение площадей торфяных месторождений по категориям современного состояния****Fig. 1. Distribution of areas of peat deposits by categories of current state (by regions)**

Анализ распределения торфяных месторождений Брестской области по категориям современного состояния показывает, что наиболее широко представлены осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования, которые составляют 264,2 тыс. га, или 53,0 % территории торфяных месторождений Брестской области (см. табл. 2, рис. 1).

Площади естественных и нарушенных болот Брестской области составляют 183,6 тыс. и 47,1 тыс. га, или 36,8 и 9,4 % территории торфяных месторождений данной области соответственно.

Торфяные месторождения, покрытые лесной растительностью, занимают площадь 4,0 тыс. га, что составляет 0,8 % территории торфяных месторождений Брестской области.

В Гомельской области также преобладают осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования, которые составляют 270,0 тыс. га, или 50,8 % территории торфяных месторождений области. Площади естественных и нарушенных болот Гомельской области составляют 160,7 и 85,3 тыс. га, или 30,3 и 16,1 % территории торфяных месторождений данной области соответственно. Торфяные месторождения, покрытые лесной растительностью, занимают площадь 14,8 тыс. га, что составляет 2,8 % территории торфяных месторождений Гомельской области.

В Могилёвской области, которая характеризуется наличием многочисленных мелкозалежных и небольших по площади торфяных месторождений, приоритетны естественные торфяные болота, площадь которых составляет 82,0 тыс. га, или 37,1 % территории торфяных месторождений области. Осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования занимают площадь в 64,9 тыс. га, что составляет 29,4 % территории торфяных месторождений Могилёвской области. Площадь нарушенных торфяных болот составляет 57,6 тыс. га, или 26,1 % территории торфяных месторождений данной области. Торфяные месторождения, покрытые лесной растительностью, лидируют относительно предыдущих областей и занимают площадь 16,4 тыс. га, что составляет 7,4 % территории торфяных месторождений Могилёвской области.

Всего по трем областям торфяные месторождения по занимаемым ими площадям распределены следующим образом: осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования – 599,1 тыс. га; естественные болота – 426,3; нарушенные болота – 190,0 тыс. га; торфяные месторождения, покрытые лесной растительностью – 35,2 тыс. га.

Созданная база данных по торфяным месторождениям и их участкам позволяет получить статистическую информацию о качественных и количественных характеристиках торфяных месторождений, в том числе о территориях участков разных категорий использования с различными типами торфяной залежи.

В табл. 3 представлены данные по распределению участков разных направлений использования по типам торфяной залежи (*итоговые данные табл. 3 могут отличаться от данных табл. 1 в меньшую сторону вследствие отсутствия информации о типе залежи некоторых месторождений – не учтены в расчетах*).

Таблица 3. Распределение площадей участков разных категорий использования трех областей по типам торфяной залежи, тыс. га

Table 3. Distribution of areas of peat deposits of different categories of the three regions by types of peat deposits, th. ha

Категория участка (ов)	Тип торфа				Всего
	низинный	верховой	смешанный	переходный	
Брестская область					
Естественное торфяное болото	130,79	3,79	9,82	38,94	183,34
Нарушенное торфяное болото	42,55	0,05	3,54	0,96	47,10
Торфяное месторождение, покрытое лесной растительностью	3,72	0,00	0,11	0,18	4,01
Осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования	258,33	0,05	5,05	0,72	264,15
Итого	435,39	3,89	18,52	40,80	498,60
Гомельская область					
Естественное торфяное болото	101,91	48,84	1,01	8,64	160,4
Нарушенное торфяное болото	79,45	1,44	1,30	2,90	85,09
Торфяное месторождение, покрытое лесной растительностью	11,61	2,32	0,07	0,43	14,43
Осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования	259,75	2,62	0,00	2,81	265,18
Итого	452,72	55,22	2,38	14,78	525,10
Могилёвская область					
Естественное торфяное болото	39,70	37,12	0,10	3,00	79,92
Нарушенное торфяное болото	43,56	10,94	0,07	1,49	56,06
Торфяное месторождение, покрытое лесной растительностью	10,57	4,96	0,11	0,74	16,38
Осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования	61,52	1,80	0,05	1,15	64,52
Итого	155,35	54,82	0,33	6,38	216,88

В Брестской области наибольшую площадь занимают торфяные залежи низинного типа – 435,39 тыс. га, верхового типа – 3,89 тыс., переходного типа – 40,8 тыс. и смешанного типа – 18,52 тыс. га (см. табл. 3).

Наиболее широко представлены торфяные месторождения низинного типа в Гомельской области: их площадь составляет 452,72 тыс. га. Площадь торфяной залежи верхового типа – 55,22 тыс. га, переходного типа – 14,78 тыс. и смешанного типа – 2,38 тыс. га.

В Могилёвской области также преобладают торфяные месторождения низинного типа, площадь которых составляет 155,35 тыс. га (см. табл. 3). Площади торфяной залежи верхового, переходного и смешанного типов распределились следующим образом: 54,82; 6,38 и 0,33 тыс. га соответственно.

Уточнение границ осушенных и интенсивно используемых в сельском хозяйстве торфяных месторождений, а также участков, выбывших из эксплуатации после добычи торфа, позволило оценить оставшиеся запасы торфа. Учитывалось уменьшение запасов торфа, имеющее место в результате промышленной добычи и потери органического вещества из-за минерализации торфа вследствие осушения и сельскохозяйственного использования торфяных месторождений. При расчете оставшихся геологических запасов из значений запасов, рассчитанных на год разведки, вычитались запасы, содержащиеся на выбывших из эксплуатации участках месторождений (часть геологических запасов на год разведки, пропорциональную выработанной части площади в границах промышленной глубины залежи) и потери торфа в результате минерализации органического вещества на площадях категории «Осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования» (9,6 т/га в год, период – 60 лет). Главным достоинством методики является ее объективность – по снимкам регистрируется реально выработанная часть месторождения, запасы с которой и вычитаются из первоначальных, а также реально используемая в сельскохозяйственном производстве площадь. Недостатками ее является возможная заниженность вычитаемых запасов в случае выработки части месторождения на глубину больше средней.

Согласно расчетам, оставшиеся запасы торфяных месторождений всех категорий, в том числе естественных и нарушенных болот, ориентировочно составляют: в Брестской области – 772,3 млн т, в Гомельской области – 798,5 млн и в Могилёвской области – 267,4 млн т (табл. 4).

Таблица 4. Распределение оставшихся запасов торфа (40%-ной условной влажности) торфяных месторождений по трем областям

Table 4. Distribution of the remaining peat reserves (40% conditional humidity) of peat deposits in three regions

Область	Геологические запасы торфа на год разведки*, млн т	Геологические запасы торфа на выбывших из эксплуатации участках, млн т	Потери торфа в результате минерализации органического вещества, млн т	Оставшиеся запасы торфа**, млн т
Брестская	966,6	126,6	69,2	772,3
Гомельская	1103,5	219,3	86,4	798,5
Могилёвская	394,9	108,9	19,1	267,4
Всего	2465,0	454,8	174,7	1838,2

*Расчет геологических запасов выполнен по данным кадастрового справочника «Торфяной фонд Белорусской ССР» (1979 г.) с учетом дополнений и уточнений, приведенных в «Схеме рационального использования и охраны торфяных ресурсов Республики Беларусь на период до 2010 года» (1989 г.).

**В расчете оставшихся запасов не учтены потери от ветровой и водной эрозии осушенных торфяных месторождений, потери от пожаров вследствие отсутствия исходных данных.

В табл. 5 представлены данные по распределению запасов торфа разных типов по участкам разных направлений использования.

На рис. 2–4 представлены статистические диаграммы распределения торфяных месторождений по величине геологических запасов торфа месторождений Брестской, Гомельской и Могилёвской областей.

Как следует из приведенных данных, для 322 месторождений Брестской области, для 1092 – Гомельской области и для 1281 – Могилёвской области, что составляет 69, 85 и 92 % месторождений этих областей соответственно, геологические запасы не превышают 500 тыс. т. При этом расчеты показали, что запасы торфяной залежи некоторых торфяных месторождений, в основном используемых в сельском хозяйстве, уже исчерпаны (141 месторождение). 1316 месторождений обладают запасами менее 40 тыс. т, не представляющими интереса для комплексной переработки (табл. 6).

Таблица 5. Распределение запасов разных типов торфа по участкам торфяных месторождений разных направлений использования Брестской области, тыс. т

Table 5. Distribution of reserves of different types of peat on the sites of peat deposits of different areas of use of the Brest region, th. tons

Категория	Тип торфа				Всего
	низинный	верховой	смешанный	переходный	
Брестская область					
Естественное торфяное болото	222,00	3,81	22,26	39,53	287,60
Нарушенное торфяное болото	55,63	0,05	9,09	1,55	66,32
Торфяное месторождение, покрытое лесной растительностью	6,96	0,00	0,30	0,25	7,51
Осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования	400,85	0,05	9,03	0,62	410,55
Всего	685,44	3,91	40,68	41,95	771,98
Гомельская область					
Естественное торфяное болото	173,26	108,71	0,26	13,7	295,93
Нарушенное торфяное болото	105,99	1,87	0,14	3,57	111,57
Торфяное месторождение, покрытое лесной растительностью	18,81	1,7	0,01	0,51	21,03
Осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования	356,07	2,91	0	4,53	363,51
Всего	654,13	115,19	0,41	22,31	792,04
Могилёвская область					
Естественное торфяное болото	50,27	68,23	0,13	4,14	122,77
Нарушенное торфяное болото	49,70	7,78	0,02	1,57	59,07
Торфяное месторождение, покрытое лесной растительностью	13,22	3,34	0,04	0,69	17,29
Осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования	62,83	1,38	0	1,12	65,33
Всего	176,02	80,73	0,19	7,52	264,46

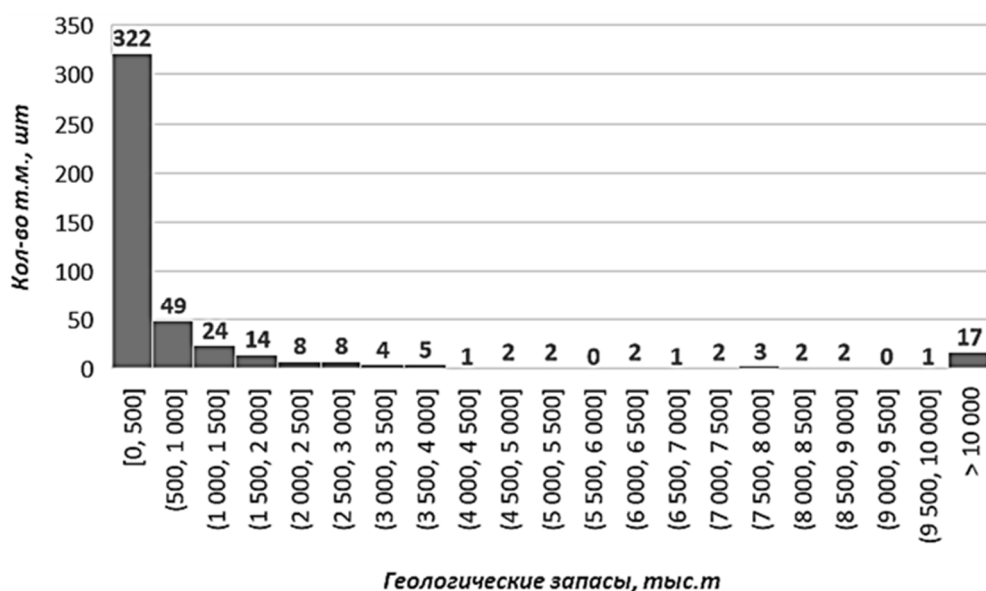


Рис. 2. Статистическая диаграмма распределения торфяных месторождений Брестской области по запасам торфа

Fig. 2. Statistical diagram of the distribution of peat deposits of the Brest region by peat reserves

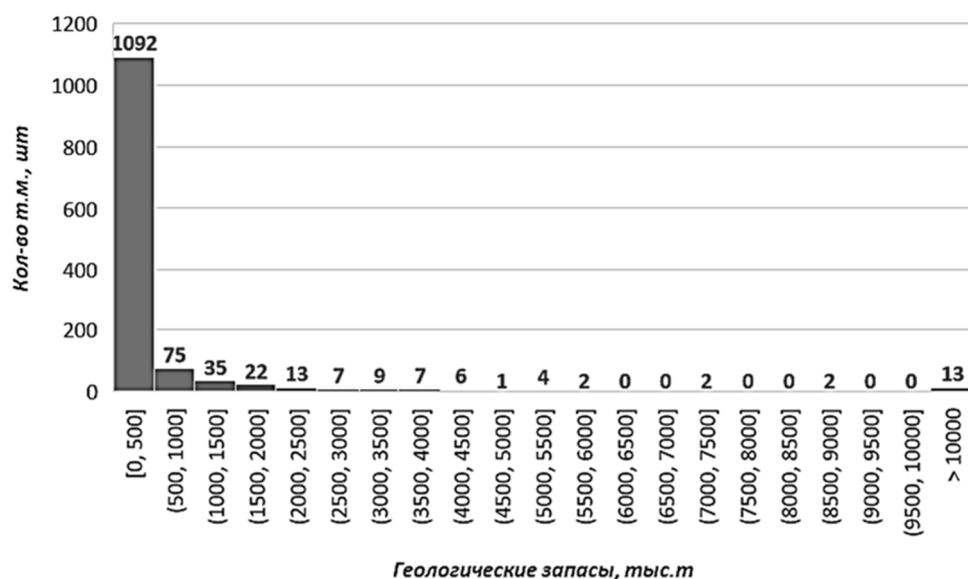


Рис. 3. Статистическая диаграмма распределения торфяных месторождений Гомельской области по запасам торфа

Fig. 3. Statistical diagram of the distribution of peat deposits of the Gomel region by peat reserves

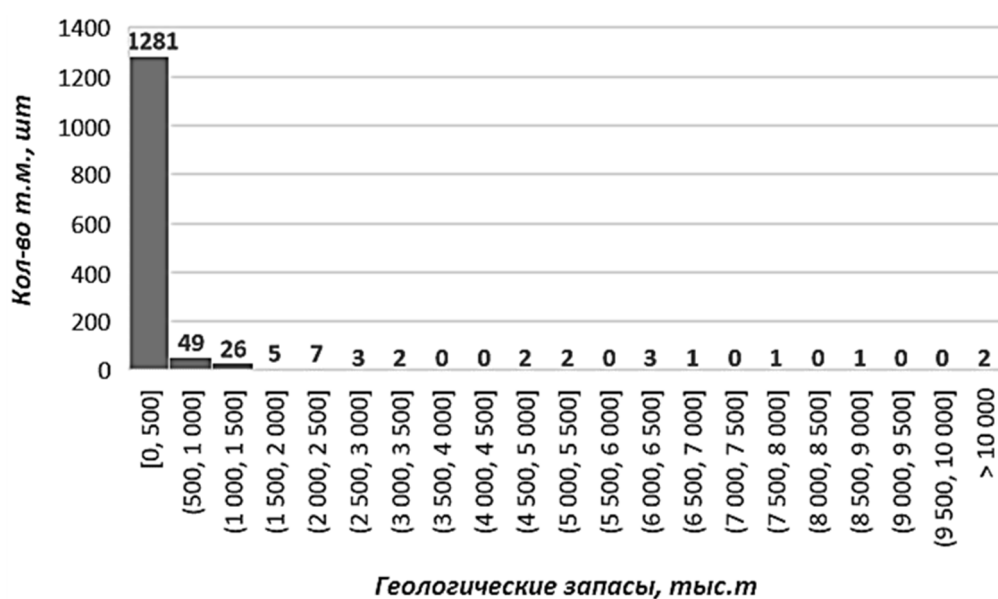


Рис. 4. Статистическая диаграмма распределения торфяных месторождений Могилёвской области по запасам торфа

Fig. 4. Statistical diagram of the distribution of peat deposits of the Mogilev region by peat reserves

Могилёвская область характеризуется наибольшим количеством торфяных месторождений с истощенными запасами торфа (83 шт.), площадь которых составляет 7,69 тыс. га (см. табл. 6). В Брестской области насчитывается 18 таких месторождений с площадью 4,97 тыс. га, в Гомельской области – 40 месторождений площадью 8,06 тыс. га. Всего в трех областях можно исключить из торфяного фонда 141 торфяное месторождение площадью 20,72 тыс. га.

Кроме того, в исследуемых областях находятся 627 торфяных месторождений площадью 17,26 тыс. га с оставшимися запасами торфа менее 10 тыс. т, которые требуют дальнейшего детального изучения.

Таблица 6. Распределение торфяных месторождений с истощенными запасами, запасами менее 10 тыс. т и менее 40 тыс. т торфа условной влажности

Table 6. Distribution of areas of peat deposits with depleted reserves, reserves of less than 10 th. tons and less than 50 th. tons of peat of conditional humidity in three regions

Область	Оставшиеся запасы торфа, тыс. т					
	0 тыс. т		< 10 тыс. т		< 40 тыс. т	
	количество, шт.	площадь, тыс. га	количество, шт.	площадь, тыс. га	количество, шт.	площадь, тыс. га
Брестская	18	4,97	29	1,77	114	9,19
Гомельская	40	8,06	266	7,62	606	24,47
Могилёвская	83	7,69	332	8,07	737	24,97
<i>Всего</i>	141	20,72	627	17,26	1457	58,63

На рис. 5 представлена диаграмма распределения запасов торфа на торфяных залежах разных глубин.

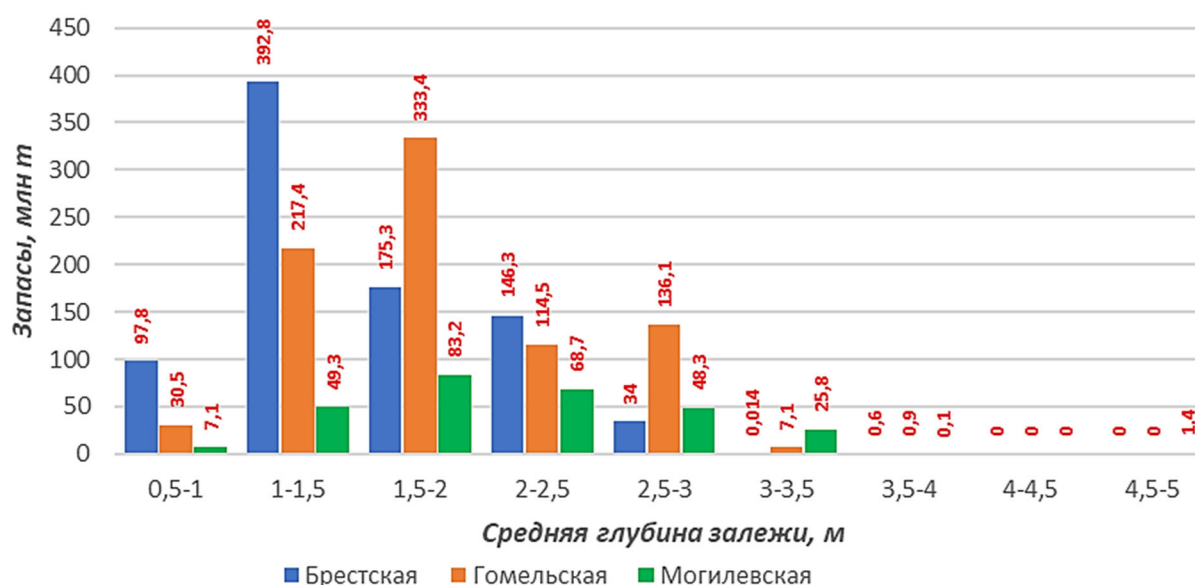


Рис. 5. Диаграмма распределения запасов торфа по глубине торфяной залежи

Fig. 5. Diagram of the distribution of peat reserves by the depth of the peat deposit

Как следует из представленных данных, максимальные запасы торфа в Брестской области локализованы на торфяных месторождениях с глубиной торфяной залежи 1,0–1,5 м, в Гомельской и Могилёвской областях – 1,5–2,0 м.

Последствия аварии на Чернобыльской АЭС больше всего сказались на торфяных месторождениях Гомельской области: к настоящему времени около 520 месторождений и участков суммарной площадью 133,8 тыс. га имеют уровень радиоактивного загрязнения 1–5 Ки/м², 153 месторождения площадью 23,0 тыс. га – 5–15 Ки/м² и 57 месторождений площадью 4,3 тыс. га – 15–40 Ки/м² (табл. 7). Оценка произведена на основе карты Республиканского центра по гидрометеорологическому контролю радиоактивного загрязнения и мониторинга окружающей среды Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 2015 года.

В Могилёвской области на территории 40,8 тыс. га 343 торфяных месторождений наблюдается уровень радиоактивного загрязнения 1–5 Ки/м², на территории 12,5 тыс. га 119 торфяных месторождений – 5–15 и на территории 2,6 тыс. га 50 торфяных месторождений – 15–40 Ки/м².

Торфяные месторождения Брестской области характеризуются сравнительно более благоприятной радиационной ситуацией: 33 месторождения площадью 24,4 тыс. га имеют уровень радиоактивного загрязнения 1–5 Ки/м² и только одно месторождение (111 га) – 5–15 Ки/м².

Таблица 7. Распределение торфяных месторождений трех областей по уровню радиоактивного загрязнения**Table 7. Distribution of peat deposits in three regions by the level of radioactive contamination**

Уровень радиоактивного загрязнения, Ки/м ²	Торфяные месторождения (участки)	
	Количество, шт.	Площадь, тыс. га
Брестская область		
1–5	33	24,4
5–15	1	0,1
15–40	–	–
Могилёвская область		
1–5	343	40,8
5–15	119	12,5
15–40	50	2,6
Гомельская область*		
1–5	520	133,8
5–15	153	23,0
15–40	57	4,3

*Территория Полесского радиационно-экологического заповедника не учитывалась.

Основными проблемами выбывших из эксплуатации и других нарушенных торфяных месторождений, неэффективно используемых в сельском и лесном хозяйствах, являются: подтопление территории из-за низкого положения в рельефе или подстилание остаточного слоя торфа водоупорными грунтами (сапропель, суглинок, глина); неблагоприятный водно-воздушный режим для произрастания сельскохозяйственных культур и условий для работы техники; увеличение расходных составляющих водного баланса осушенного торфяного месторождения за счет интенсивного стока грунтовых вод по осушительной сети; изменение зоны и режима аэрации торфогенного слоя в торфяной залежи; прекращение процесса накопления торфа и уплотнение торфяной залежи; пожароопасная обстановка. Согласно Стратегии сохранения и рационального (устойчивого) использования торфяников в Беларуси из 281,5 тыс. га выбывших из эксплуатации торфяных месторождений 143,4 тыс. га подлежат экологической реабилитации, более 83,8 тыс. га частично или полностью обводнены и находятся в процессе восстановления [1, 2]. И только 54,3 тыс. га можно признать как эффективно используемые для сельского и лесного хозяйства.

Результаты исследований настоящего проекта по трем областям показали наличие 130,0 тыс. га выбывших из эксплуатации площадей торфяных месторождений. Значительная их часть относится к категории нарушенных торфяных болот, покрытых древесно-кустарниковой растительностью (см. рис. 6). В Брестской области это значение составляет 28,5 тыс. га (72,52 %), в Могилёвской области – 28,7 тыс. (78,20), в Гомельской области – 39,2 тыс. га (72,46 %).

Эффективно используются в сельском хозяйства, т. е. относятся к категории осушенных земель с торфяными почвами, в Брестской области – 10,5 тыс. га (26,72 %), в Могилёвской области – 7,4 тыс. (20,16) и в Гомельской области – 14,5 тыс. га (26,80 %).

Выбывшие из эксплуатации торфяные месторождения, покрытые лесной растительностью, занимают в Брестской области – 0,3 тыс. га (0,76 %), в Могилёвской области – 0,6 тыс. (1,63) и в Гомельской области – 0,4 тыс. га (0,74 %).

Таким образом, в результате выполнения проекта на основе разработанной в ГИС-формате базы данных по торфяным месторождениям Брестской, Гомельской и Могилёвской областей Республики Беларусь получен актуальный статистический материал о современном состоянии и использовании территорий торфяных месторождений.

На рис. 7–9 приведены карты торфяных месторождений Брестской, Гомельской и Могилёвской областей с выделением участков различных категорий.

Заключение. Всего по Брестской области проанализировано 469 разведанных торфяных месторождений с площадью более 10 га, в Гомельской области – 1290 и в Могилёвской области – 1385, площадь которых составляет 498,9; 530,8 и 221,0 тыс. га соответственно. По используемой при расчетах методике оставшиеся геологические запасы торфа составляют: в Брестской области – 772,3 млн т, в Гомельской области – 798,5 млн и в Могилёвской области – 267,4 млн т.

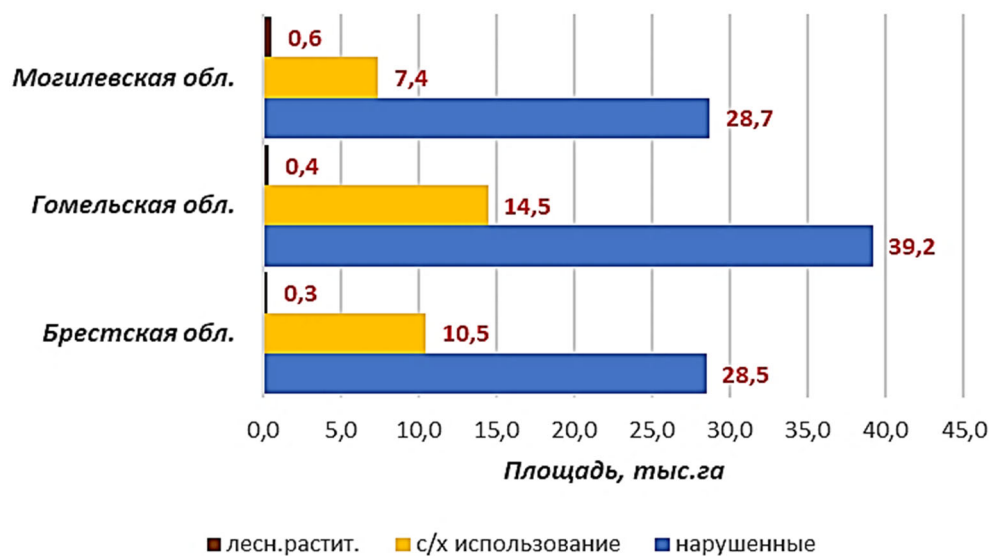


Рис. 6. Состояние выбывших из эксплуатации участков торфяных месторождений Брестской, Гомельской и Могилёвской областей

Fig. 6. Condition of decommissioned areas of peat deposits of Brest, Gomel and Mogilev regions

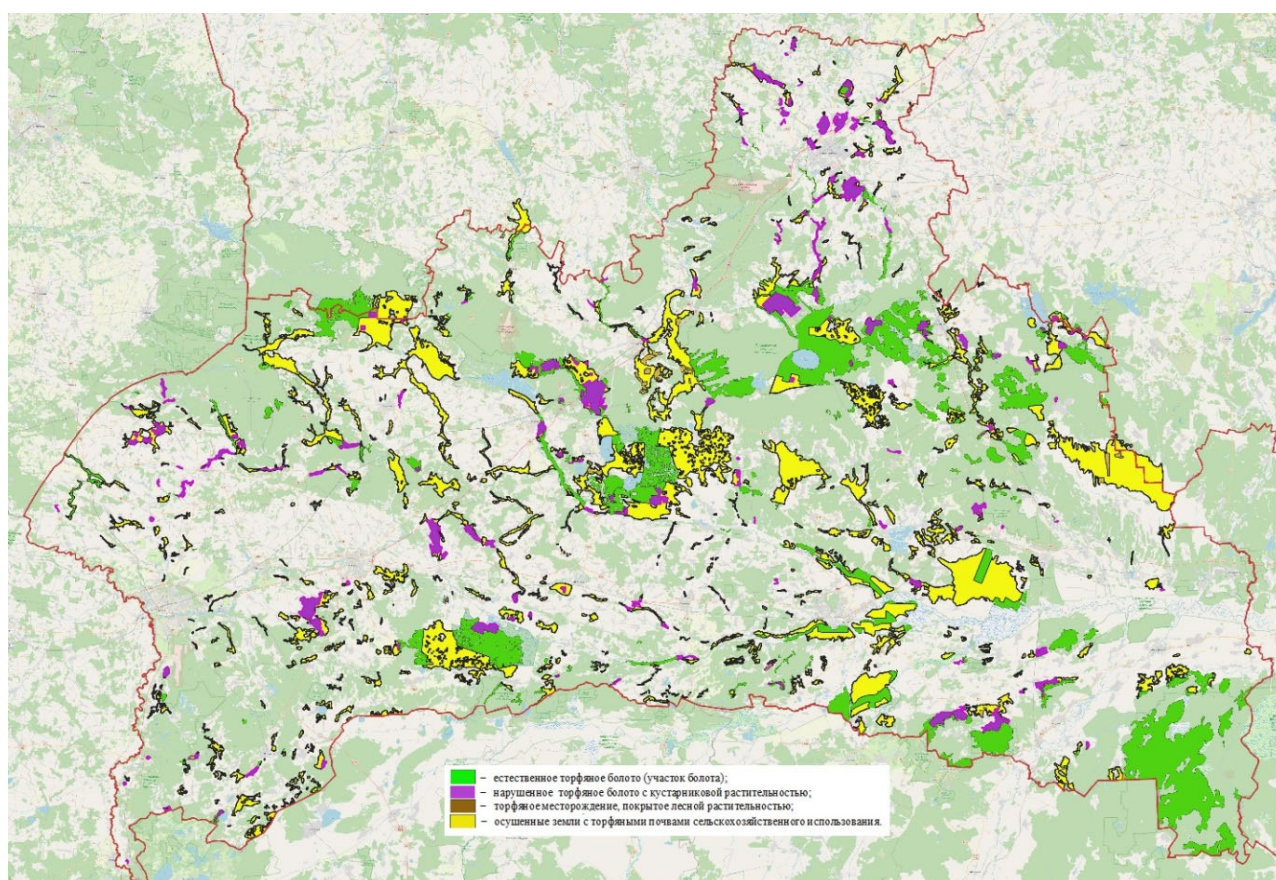


Рис. 7. Карта торфяных месторождений Брестской области

Fig. 7. Map of peat deposits of the Brest region

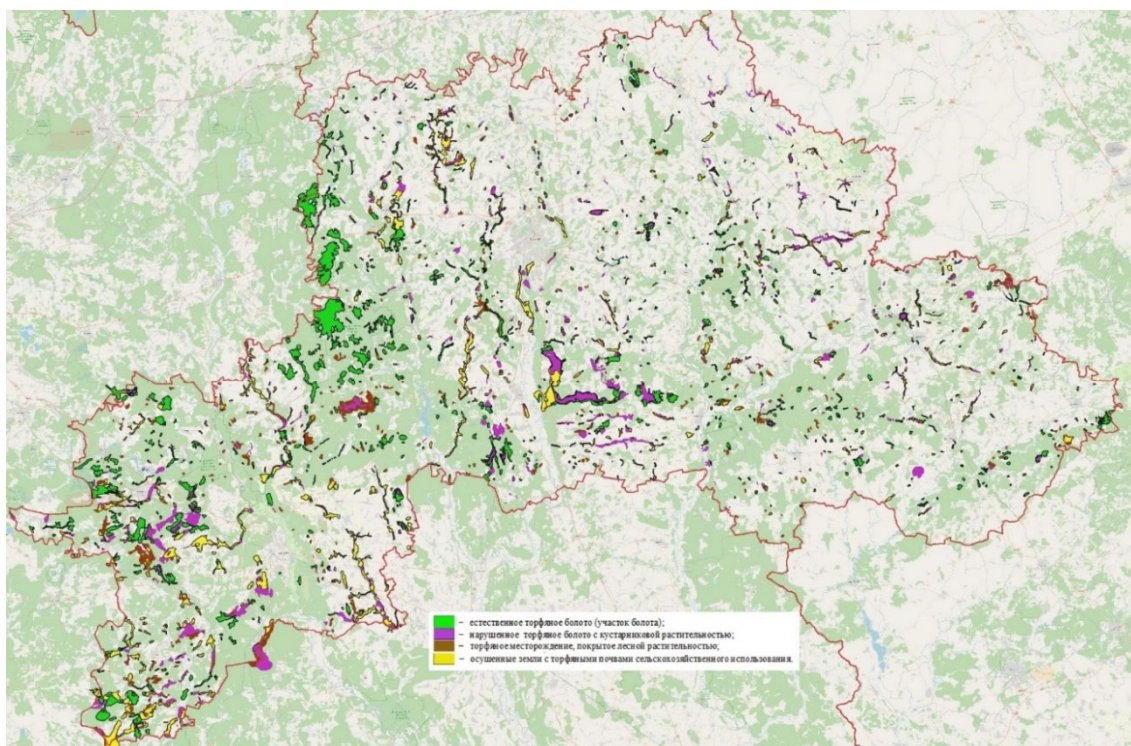


Рис. 8. Карта торфяных месторождений Могилёвской области

Fig. 8. Map of peat deposits of the Mogilev region

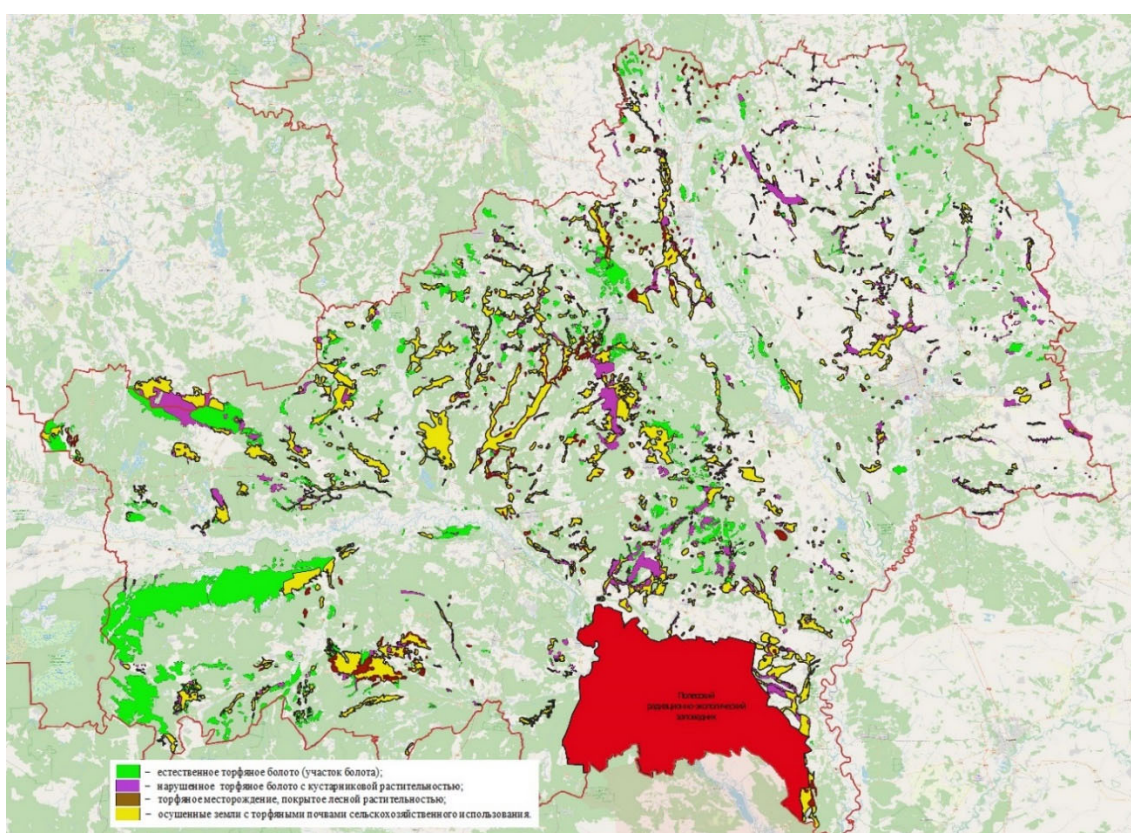


Рис. 9. Карта торфяных месторождений Гомельской области

Fig. 9. Map of peat deposits of the Gomel region

Анализ спутниковых снимков территорий торфяных месторождений Брестской, Гомельской и Могилёвской областей показал, что в ненарушенном состоянии (естественные торфяные болота) находится 30–37 % площадей торфяных месторождений. Основная часть (более 50 %) в Брестской и Гомельской областях – это осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования, в Могилёвской области – около 30 %; запасы торфа на них – 410,55 тыс. т (53 %) и 363,1 тыс. т (46 %) – для Брестской и Гомельской областей и 65,33 тыс. т (25 %) для Могилёвской области.

Месторождения низинного типа во всех изученных областях занимают наибольшую площадь.

Оставшиеся геологические запасы торфа не превышают 500 тыс. т в подавляющем большинстве месторождений (69, 85 и 92 % в Брестской, Гомельской и Могилёвской областях соответственно).

Во всех трех областях находится 141 месторождение с истощенными запасами торфа и 1457 месторождений (46 % от общего числа) с геологическими запасами менее 40 тыс. т (запасы, не представляющие интереса для комплексной переработки торфа).

Максимальные запасы торфа в Брестской области локализованы на торфяных месторождениях с глубиной торфяной залежи 1,0–1,5 м, в Гомельской и Могилёвской областях – 1,5–2,0 м.

Из выбывших из эксплуатации площадей торфяных месторождений эффективно используются в сельском хозяйстве, т. е. относятся к категории осушенных земель с торфяными почвами, в Брестской области 10,5 тыс. га (26,72 %), в Могилёвской области – 7,4 тыс. (20,16) и в Гомельской области – 14,5 тыс. га (26,80 %); площади, не используемые эффективно – заросшие кустарниками, в Брестской области составляют 28,5 тыс. га (72,52 %), в Могилёвской области – 28,7 тыс. (78,20), в Гомельской области – 39,2 тыс. га (72,46 %).

Список использованных источников

1. Стратегия сохранения и рационального (устойчивого) использования торфяников. Утверждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 30 декабря 2015 г. № 1111.
2. Схема распределения торфяников по направлениям использования на период до 2030 года. Утверждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 30 декабря 2015 г. № 1111.

References

1. Strategy for the conservation and rational (sustainable) use of peatlands. Approved by resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated December 30, 2015, no. 1111.
2. The scheme of distribution of peatlands in the directions of use for the period up to 2030. Approved by the resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated December 30, 2015, no. 1111.

Информация об авторах

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

Навоша Юльян Юльевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: navosha@tut.by

Тановицкая Нина Ивановна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: 4tni@mail.ru

Ратникова Ольга Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: 306peatlands@mail.ru

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

Yulian Yu. Navosha – Ph. D. (Physical and Mathematical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: navosha@tut.by

Nina I. Tanavitskaya – Ph. D. (Technical), Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: 4tni@mail.ru

Olga N. Ratnikova – Ph. D. (Technical), Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (F. Skoriny Str., 10, 220076, Minsk, Belarus). E-mail: 306peatlands@mail.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-103-111>
УДК 552.08(375)

Поступила в редакцию 29.03.2022
Received 29.03.2022

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД КЕМБРИЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРИБУГСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОДЛЯССКО-БРЕСТСКОЙ ВПАДИНЫ

С. Е. Шпак

Открытое акционерное общество «Газпром трансгаз Беларусь», Минск, Беларусь

Аннотация. Приведены обобщенные результаты исследований физических свойств пород по разрезу кембрийских отложений (рытская, страдечская, спановская, бугская и орлинская свиты) Прибугской структуры в пределах одноименного подземного хранилища газа (ПХГ). Исследовано более 120 образцов горных пород, равномерно распределенных по всей мощности кембрийских отложений из интервала глубин 889–1240 м. Породы-коллекторы представлены преимущественно кварцевым мелко-, среднезернистым песчаником с различной степенью сортировки и окатанности зерен, типом цементации, глинистости. Породы-покрышки представлены алевролитом глинистым с наличием мелких прослоев тонкозернистых песчаников и алевролитов, глинами алевроитистыми, аргиллитоподобными.

Данные лабораторных исследований включают результаты исследования химического, гранулометрического составов пород, определение карбонатности и глинистых минералов в породах, определение плотности, открытой и закрытой пористости, проницаемостей по газу и по пластовой воде на специально подготовленных образцах, исследование порового пространства пород с помощью цифровых фотографий. Установлены особенности фильтрационно-емкостных свойств пород, используемых при проведении мероприятий и выработке рекомендаций по повышению эффективности использования порового пространства отложений структуры, направленных на повышение эффективности эксплуатации Прибугского подземного хранилища газа.

Ключевые слова: порода горная; порода-коллектор; порода-покрышка; подземное хранилище газа; состав вещественный; свойства физические.

Для цитирования. Шпак С. Е. Физические свойства пород кембрийских отложений Прибугской структуры Подляско-Брестской впадины // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 103–111.

THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE CAMBRIAN ROCKS OF THE BUG STRUCTURE OF THE PODLASSKO-BREST DEPRESSION

S. Ya. Shpak

Open Joint Stock Company "Gazprom Transgaz Belarus", Minsk, Belarus

Abstract. The generalized results of studies of the physical properties of rocks along the section of Cambrian deposits (Rytskaya, Stradechskaya, Spanovskaya, Bugskaya and Orlinskaya formations) of the Pribug structure within the same-name underground gas storage (UGS) are presented. More than 120 rock samples evenly distributed throughout the thickness of the Cambrian deposits from the depth range of 889–1240 m were studied. The reservoir rocks are mainly quartz fine- and medium-grained sandstone with varying degrees of grading and grain rounding, type of cementation, clay content. The cap rocks are represented by clayey siltstone with the presence of small fine-grained sandstone and siltstone bands and by silty mudstone-like clays.

Laboratory research data include the results of the study of chemical, granulometric compositions of the rocks, determination of carbonate and clay minerals in the rocks, determination of density, open and closed porosity, gas and reservoir water permeability on the specially prepared samples, study of the pore space of the rocks using digital photographs. The established features of filtration-capacitance properties of the rocks can be used for carrying out activities and developing recommendations to improve the efficiency of using the pore space of the deposits of the structure aimed at upgrading operation of the Pribug gas storage.

Keywords: rock; reservoir rock; cap rock; underground gas storage; material composition; physical properties.

For citation. Shpak S. Ya. The physical properties of the Cambrian rocks of the Bug structure of the Podlassko-Brest depression. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 103–111.

Введение. В настоящее время в пределах Прибугской структуры Подляско-Брестской впадины эксплуатируется Прибугское подземное хранилище газа (ПХГ). В качестве основного пласта-коллектора используются отложения страдечской свиты кембрийской системы, которые приурочены к антиклинальной структуре с коленчатым изгибом (флексурой), осложненной разрывным нарушением на опущенном крыле (рис. 1) [1–3].

Цель работы – изучить состав и физические свойства горных пород, в основном по мощности кембрийских отложений, на примере результатов лабораторных исследований керна, отобранного из глубоких скважин хранилища. Рассмотрены результаты исследования наиболее характерных отложений структуры (породы рытской, страдечской, спановской, бугской, величковичской, ставской и орлинской свит). Дано петрографическое описание наиболее представительных образцов пород с использованием результатов лабораторных исследований их минерального, гранулометрического и химического составов. Исследовано более 120 образцов горных пород, равномерно распределенных по всей мощности кембрийских отложений из интервала глубин 889–1240 м.

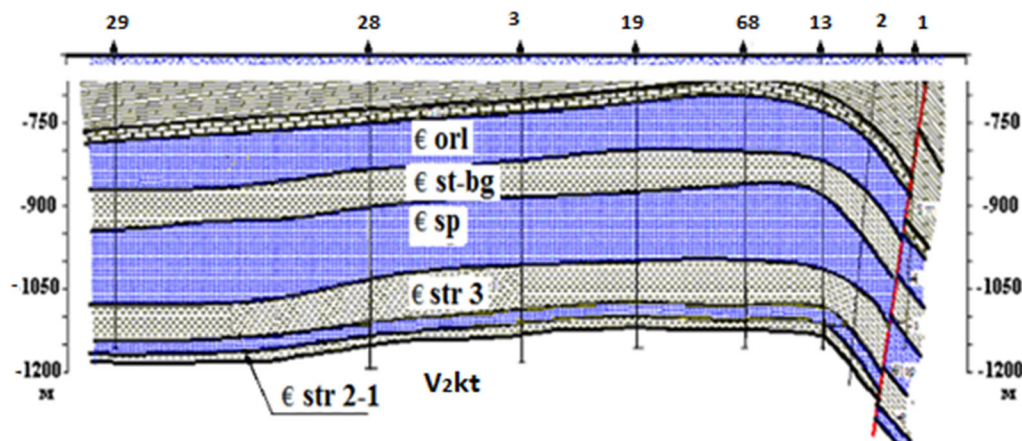


Рис. 1. Геологический разрез кембрийских отложений в пределах Прибугской структуры

Fig. 1. Geological section of Cambrian sediments within the Pribug structure

Данные и методы исследования. Для анализа использованы данные лабораторных исследований горных пород, выполненные сотрудниками отдела физико-химических методов исследований РУП «Научно-практический центр по геологии» и находящиеся в фондах ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». Данные включают результаты исследования химического, гранулометрического составов пород, определение карбонатности и глинистых минералов в породах, определение плотности, открытой и закрытой пористости, проницаемостей по газу и по пластовой воде на специально подготовленных образцах, исследование порового пространства пород с помощью цифровых фотографий. Автором данной работы проведен отбор образцов керна и их дополнительное описание.

Состав и свойства горных пород определены по общепринятым методикам в соответствии с действующими ГОСТами. Подробное описание методов исследования приведено в [4].

Результаты и их обсуждение. В пределах Прибугской локальной структуры в составе кембрийских отложений выделены рытская (ϵ_{1rt}), страдечская (ϵ_{1str}), спановская (ϵ_{1sp}), бугская (ϵ_{1bg}), величковичская (ϵ_{1vl}) свиты нижнего кембрия, а также ставская (ϵ_{2st}) и орлинская (ϵ_{2or}) свиты среднего кембрия [2, 5–8].

Рытская свита. Средняя мощность свиты в пределах структуры не превышает 10 м. Породы представлены преимущественно глинами и глинистыми алевритами, в кровельной части – плотным мелкозернистым песчаником с глинисто-железистым цементом порового типа. По данным геохимических исследований породы свиты наиболее резко выделяются по повышенному содержанию окислов железа, алюминия и магния [4].

В исследованных глинистых образцах пород свободное поровое пространство практически отсутствует. Однако выделяются участки пород, в которых отмечается наличие пор, ориентированных преимущественно по напластованию на определенных глубинах залегания (рис. 2). В ряде скважин, по материалам геофизических исследований скважин, установлена гидродинамическая связь рытского горизонта с нижележащими отложениями протерозоя, что свидетельствует о соединении порового пространства пород по мощности горизонтов и появлении проницаемых литологических окон в теле отложений.

Обобщенные данные лабораторных исследований образцов горных пород рытских отложений, приведенные в табл. 1, свидетельствуют, что в целом породы свиты характеризуются низкими значениями открытой пористости (в среднем 5,5 %), средней проницаемости (меньше 0,3 мД) и повышенной остаточной водонасыщенностью (около 50 %). Проницаемость пород вдоль оси керна (поперек напластования) составляет первые единицы мД, хотя их общая пористость часто превышает 10 % за счет наличия пор, ориентированных вдоль напластования.

Высокая остаточная водонасыщенность породы свидетельствует, что большая часть пор даже при высоких температурных нагрузках на образец не участвует в процессе фильтрации. Такие породы не являются коллектором, однако они также характеризуются низкими флюидоупорными свойствами.

Известно, что нижняя граница рытской свиты, совпадающая с границами кембрийской системы в целом, обозначена не только сменой палеонтологических характеристик, но и различными литолого-минералогическими особенностями [2, 5, 7]. Имеющиеся геохимические данные лабораторных исследований образцов горных пород указывают, что при переходе от рытской свиты кембрия к породам котлинских отложений протерозоя отмечается резкое уменьшение фосфора и кальция вплоть до их полного исчезновения в породе, что может быть дополнительным геохимическим критерием определения границы кембрийских и протерозойских отложений.



Рис. 2. Фотография участка образца породы рытской свиты (глина алевролитистая, глубина 1234,6 м, скважина 71) с наличием порового пространства (белые участки)

Fig. 2. Photo of the rock sample site of the Rytskaya formation (siltstone clay, depth 1234.6 m, well 71) with the presence of pore space (white sections)

Таблица 1. Обобщенные физические параметры образцов горных пород рытской свиты

Table 1. Generalized physical parameters of rock samples of the Rytskaya formation

Глубина, м	Плотность породы, г/см³	Пористость, %		Проницаемость, мД		Остаточная водонасы- щенность, V _{воды} /V _{пор} , %
		общая	открытая	по азоту	по воде	
Скважина 47, 1 образец						
1220,8	2,33	12,76	5,47	0,3369	0,58	49,30
Скважина 69, 2 образца						
1231,0–1233,7	2,54–2,57	4,67–6,47	0,87–0,97	0,12–0,2	–	–
Скважина 71, 6 образцов						
1233,5–1236,5	2,25–2,34	13,3–16,58	12,06–14,78	1,14–5,49	0,77–5,88	35,2
Скважина 44, 3 образца						
1235,0–1236,5	2,38–2,61	3,51–11,94	3,03–0,75	0,23–0,45	0,04–0,06	–
Скважина 70, 1 образец						
1239,7	2,52	5,73	1,61	0,38	–	–
Скважина 46, 1 образец						
1241,7	2,42	9,34	4,84	0,1194	0,49	48,17
Скважина 100, 3 образца						
–	2,00–2,16	16,12–17,59	15,31–17,22	–	–	–

Страдечская свита. Общая мощность отложений страдечской свиты в пределах структуры изменяется от 80 до 125 м. Свита ритмично построена [5, 7]: пропластки песчаников сменяются глинистыми алевролитами и глинами. В подошве страдечских отложений расположен пропласток, представленный песчаниками и являющийся основным объектом хранения газа (E_1str_{2-I}). В кровле страдечской свиты расположен преимущественно глинистый хорошо выраженный в пределах структуры пропласток (E_1str_{3-II}), представляющий региональный флюидоупор и являющийся пластом-покрышкой для ниже-расположенных песчаников страдечской свиты [5, 8].

Песчаники пропластка $\epsilon_1 str_{2-1}$ характеризуются высоким содержанием кварца (до 90 %), низкими значениями окислов калия и алюминия, определяющих низкую глинистость пород (до 4–5 %). Низкое содержание глинистых минералов, особенно гидрослюды в породе, обуславливает в целом высокую проницаемость пород. Несмотря на простоту минерального состава, эти породы характеризуются широким спектром фильтрационно-емкостных свойств, что связано с неоднородностью и разнообразием их порового пространства.

Как правило, проницаемость песчаников по напластованию (в крест оси керна) превышает ее значения вдоль оси керна до 2 раз, отражая ориентированность пор по напластованию образований [4]. Такие значения проницаемости присущи для пород большинства исследованных скважин, что свидетельствует об их распространении практически по всей площади структуры.

Установлено, что в разрезе отложений встречаются отдельные маломощные пропластки пород со схожим составом и физическими свойствами, на которые оказывают влияние форма зерен и особенности их упаковки в матрице, связанные с процессами ее перестройки в процессе литогенеза. Такие породы, как правило, имеют низкую пористость и проницаемость. Они могли быть организованы за счет перестройки матрицы коллектора и его цемента в ходе стадийных процессов геологического развития территории. В ходе перекристаллизации обломочной матрицы пород коллектора обычно происходят процессы, нарушающие и изменяющие первичную структуру порового пространства и его минерального состава. При этом часто происходит разложение неустойчивых элементов матрицы и цемента и рекристаллизация устойчивых минералов, конечной стадией которых становится кварц, изменяющий свою форму и принимающий кристаллографические очертания. Такие образования часто могут переходить в непроницаемые или частично проницаемые участки с увеличенной извилистостью пор и изменением их направленности, что наблюдается для пород кровли большинства скважин, перфорированных на $\epsilon_1 str_{2-1}$ Прибугского ПХГ. Выявленные участки пород имеют, как правило, повышенные значения карбонатности (в основном за счет кальцита – до 20–25 %), электрического сопротивления (до 500 Ом·м) и характеризуются пониженной пористостью, проницаемостью и повышенной плотностью за счет доломитизации. Такие участки пород мощностью до 3–4 м установлены в кровле пласта $\epsilon_1 str_{2-1}$ ряда скважин ПХГ [8].

Результаты обработки данных лабораторных исследований образцов керна основного пласта-коллектора ПХГ приведены в табл. 2. Они указывают на значительный разброс физических и фильтрационно-емкостных свойств исследуемых пород, что связано (как указывалось ранее) с формой зерен, особенностями их упаковки в матрице, распределением цемента и характером катагенетических преобразований в процессе развития. Так, общая пористость пород нижнеэрадечских отложений изменяется от 2,8 до 22,8 % при средних значениях 17,5 %. Близкими значениями и их вариациями отмечается открытая пористость. Повышенные значения открытой пористости (до 18,5 %) характерны для пород центральной части структуры и ее северо-восточной периклинали, несколько меньшие (до 15 %) – на юго-западе. На крыльях структуры и в ее привзбросовой части открытая пористость пород снижается до 10 %. Большинство пород-коллекторов с высоким содержанием кварца и низкой глинистостью характеризуется относительно повышенной (более 500 мД) проницаемостью и более низкой остаточной водонасыщенностью, составляющей в среднем 30 %.

Таблица 2. Обобщенные параметры образцов горных пород отложений $\epsilon_1 str_{2-1}$

Table 2. Generalized parameters of rock samples of deposits $\epsilon_1 str_{2-1}$

Глубина, м	Плотность породы, г/см ³	Пористость, %		Проницаемость, мД		Остаточная водонасыщ., V _{воды} /V _{пор} , %
		общая	открытая	по азоту	по воде	
Скважина 44, 15 образцов						
1221,2–1233,5	2,09–2,53	6,21–22,81	5,61–20,64	0,69–804,88	0,07–601,2	36,1–38,2
Скважина 71, 18 образцов						
1220,2–1232,5	2,14–2,62	2,81–20,81	2,48–18,63	0,58–816,71	0,09–527,4	29,6–68,7
Скважина 46, 8 образцов						
1225,4–1239,0	2,09–2,43	18,19–21,95	15,28–19,5	31,08–444,7	56,8–412,6	18,74–37,12
Скважина 47, 2 образца						
1215,7–1219,3	2,28–2,36	11,64–14,47	9,74–11,64	15,62–281,15	12,9–335,3	19,93–38,91
Скважина 100, 14 образцов						
1266,6–1289,84	1,97–2,38	13,73–22,37	13,02–21,7	–	–	–

Средняя часть страдечских отложений (E_1str_{2-II}) представлена ритмично чередующимися и относительно выдержанными по простиранию преимущественно глинистыми и песчаными пропластками пород. Выделено три глинистых и два песчаных пропластка мощностью от 2 до 15 м каждый [8].

Глинистые пропластки представлены в основном глинами аргиллитоподобными зеленовато-серого цвета, слюдистыми, тонко-грубослоистыми. Глины, как правило, некарбонатные, с одинаковой оптической ориентировкой глинистых частиц, с различной степенью хлоритизации основного материала. Отмечается слоистость, обусловленная наличием тонких, прерывистых невыдержанных слоев и линз кластического материала светло-серого цвета мощностью 0,1–0,5 см. По данным экспериментальных определений абсолютная газопроницаемость глинистых пачек колеблется от 0,0004 до 0,001 мД при более высокой проницаемости (до 0,016 мД) для образцов породы с высоким содержанием алевролитового материала.

Преимущественно песчаные пропластки представлены полевошпатовым и глауконитово-кварцевым песчаником в различной степени заглинизированными. По данным лабораторных исследований они имеют достаточно высокую открытую пористость (12,0–17,3 %). Их проницаемость по вертикали достигает 80 мД, а по горизонтали – 300 мД.

Завершаются отложения страдечской свиты пачкой пород, представленной пластом преимущественно песчаников (E_1str_{3-I}) и глин (E_1str_{3-II}) [7]. Мощность песчаников в пределах структуры изменяется от 5 до 20 м, а глинистых отложений – от 30 до 45 м.

Песчаники пласта E_1str_{3-I} серые, разномелкозернистые, преимущественно средне-мелкозернистые, в основном кварцевые, иногда глауконито-кварцевые, отсортированные, с карбонатно-глинистым, железисто-карбонатным цементом порового и контактно-порового типов. Анализ имеющихся данных лабораторных исследований пород из скважин 100 и 100-бис показывает, что образцы проницаемых песчаников имеют открытую пористость 13,0–19,5 % (среднее – 17,0 %), эффективную – 13,0–19,0 % (среднее – 14,2 %). Проницаемость их по вертикали достигает 470 мД, а по горизонтали – 880 мД, характеризую анизотропию пород по вертикали. Данные интерпретации геофизических исследований скважин практически совпадают с данными лабораторных исследований керна.

Глинистый пласт E_1str_{3-II} хорошо выдержан по мощности и простираню и является надежным региональным флюидоупором для всех горизонтов страдечской свиты. Глины преимущественно серые и зеленовато-серые с синеватым оттенком, алевритистые, с линзовидными тонкими прослоями тонкозернистых песчаников и алевролитов. Породы плотные, алевро-пелитовой структуры, тонко горизонтально слоистые и массивные, средней крепости. Слоистость обусловлена различным содержанием алевритового материала на контакте слоев.

Результаты исследования химического состава пород пласта E_1str_{3-II} показывают [4], что в породах отмечается полное отсутствие хлоридов, весьма низкое содержание сульфатов. Содержание СаО по отдельным образцам превышает 10 %. Содержание окиси алюминия практически для всех образцов достигает 20 % и более, что связано с наличием каолинита в наиболее глинистых прослоях. Увеличенное содержание железа отмечается для образцов породы по всему разрезу, что обусловлено высокой глинистостью отложений. Окись калия концентрируется в гидрослюдах и калиевых полевых шпатах. Практически все исследуемые образцы пород имеют высокое (до 30 %, а отдельные до 60 %) содержание глинистой фракции (меньше 0,002 мм).

Анализ физических свойств 18 образцов пород из скважины 44, равномерно распределенных по мощности отложений, указывает на относительно высокую общую (среднее – 15,0–17,0 %) и открытую (среднее – 13,0–15,0 %) пористости и весьма низкую проницаемость, составляющую первые единицы мД. Относительно высокая пористость глин может быть объяснена процессом погружения осадков на глубину и воздействия давления и температуры на уплотнение, что вызвало дегидратацию отложений и возрастание емкостных свойств породы. Этому могло способствовать удаление адсорбционной воды, а также аргиллитизация пород, приводящие к повышению общей пористости. В глинистых породах E_1str_{3-II} , подобно аналогичным породам рытской свиты (см. рис. 1), развивалась ленточная пористость по напластованию слоев с более высокой проницаемостью породы по этому направлению относительно проницаемости, определенной поперек напластования. Данные указывают, что такие значения проницаемости различаются в 8 раз и более, свидетельствуя о значимой анизотропии физических свойств глинистого пласта E_1str_{3-II} в пределах структуры.

В целом по данным экспериментальных определений глинистая покрывка страдечского горизонта (E_1str_{3-II}) имеет абсолютную газопроницаемость, которая в основном колеблется от $1,74 \cdot 10^{-4}$ до $6,5 \cdot 10^{-3}$ мД, что свидетельствует о ее достаточно высоких изолирующих свойствах [8].

Спановская свита. В пределах структуры спановские отложения залегают на породах страдечской свиты и представлены преимущественно песчаными образованиями [5, 9]. Мощность свиты достигает 150 м.

По составу минералообразующих компонентов песчаники спановских отложений характеризуются высоким содержанием кварца (около 90 %) и низкими значениями практически всех остальных химических компонентов. В отдельных образцах (например, для скв. 74 с глубин 1069,1–1085,8 м и 1100,1–1120,3 м) кварцевые породы практически не содержат примесей. Однако в образце с глубины 1068,6 м содержание глин достигает 17 %.

Степень пористости песчаников определяется, с одной стороны, распределением размера обломочных зерен, а с другой – типом цементации. Пористые песчаники характеризуются, как правило, близкими размерами обломочных зерен, низкой степенью преобразованности полевых шпатов, пленочным глинистым цементом и (или) без цементации. Поры в таких песчаниках в основном мелко- и крупнокапиллярные, чаще сообщающиеся.

Для непористых или слабопористых песчаников характерно наличие обломочных зерен разной размерности и (или) глинисто-железистого пленочно-порового или порового цемента. Поры в таких песчаниках в основном изолированные тетраэдрические и ромбоэдрические мелкокапиллярные.

Известно [8, 10], что в разрезе спановских отложений присутствуют маломощные (до 1 м) пропластки с пониженным содержанием кварца и повышенным содержанием в цементирующей части окислов железа, калия, алюминия, магния и натрия, которые тесно связаны с наличием глинистых компонентов в породе. Выявлено три таких пропластка с весьма низкими коллекторскими свойствами, которые могут быть локальным экраном в пределах структуры. Такие породы отмечены на глубине 1065,4 м скв. 103-б, а также на глубинах 1068,6, 1091,6 и 1098,5 м скв. 74. Цементация зерен в таких породах осуществляется по типу практически полного заполнения пористого пространства цементом [8]. Кроме того, для таких образований характерно повышение мелкозернистой алевритовой фракции и глины.

Несмотря на простоту минерального состава (как это показано выше), песчаники спановских отложений характеризуются широким спектром фильтрационно-емкостных свойств, что связано с неоднородностью их порового пространства (табл. 3). Минимальной проницаемостью (сотые доли мД) характеризуются выделенные выше алеврито-глинистые пропластки с повышенным содержанием глины.

Обработка имеющихся петрофизических данных пород свиты показывает, что их общая пористость составляет в среднем 23 %, открытая 15–18 %, а проницаемость по азоту – 600 мД (табл. 3). При этом проницаемость по азоту и воде часто сопоставимы, что свидетельствует о высокой степени чистоты порового пространства пород. В целом в связи с высокой общей проницаемостью пород свиты их остаточная водонасыщенность достаточно низкая (около 25 %) и лишь отдельные значения для алеврито-глинистых пород достигают 60 %.

Таблица 3. Обобщенные фильтрационно-емкостные свойства пород спановских отложений Прибугской структуры

Table 3. Generalized filtration-capacitive properties of rocks of Span deposits of the Pribug structure

Глубина, м	Плотность, г/см³	Пористость, %		Проницаемость, мД		Остаточная водонасыщенность, %
		общая	открытая	по азоту	по воде	
Скважина 106-б						
1133,7	2,00	–	25,8	1856	1660,0	
Скважина 103-б						
1065,4	2,30	–	13,1	5,5	5,0	
Скважина 74. Исследовано 28 образцов						
1061–1140	1.89–2.27	15.21–41.83	6.56–32.39	1.58–1003.6	0.02–904.6	19–62

Бугская и величковичская свиты. Бугские отложения мощностью 45–50 м представлены чередованием пластов глинистых и песчанистых образований. Они в пределах структуры перекрывают спановские отложения и в целом являются для них флюидоупором. Величковичская свита завершает разрез нижнего кембрия.

В основании бугских отложений повсеместно прослеживается пласт плотных, пластичных глин мощностью до 7 м, которые выделяются повышенным содержанием Al_2O_3 , высокой глинистостью, весьма низкими значениями пористости (7,6–8,2 %) и проницаемости пород (0,0006–0,0007 мД) (табл. 4).

Таблица 4. Фильтрационно-емкостные параметры глинистых пород бугских отложений из скважины 99

Table 4. Filtration-capacitive parameters of clay rocks of Bug deposits from well 99

Глубина, м	Плотность, г/см ³	Среднее значение проницаемости, мД	Открытая пористость, %
986,0	2,39	0,008	9,60
998,0	2,58	0,0006	7,55
999,0	2,57	0,0007	8,22

Отсутствие глин на отдельных участках структуры (например, в районе скв. 16 и 37) приводит к наличию гидродинамической связи между спановскими отложениями и нижней песчаной пачкой бугской свиты, что ставит под сомнение отнесение бугских отложений в качестве покрывки для спановских отложений.

Расположенные выше бугские песчаники в целом имеют сходные со спановскими песчаниками фильтрационно-емкостные свойства (см. табл. 4).

Ставская и орлинская свиты. Ставская и орлинская свиты представляют средний отдел кембрийской системы и в целом завершают разрез кембрийских отложений в пределах структуры. Суммарная мощность свит слабо изменяется по площади структуры и составляет в среднем 90–100 м.

Ставская свита представлена ритмичным чередованием мелкозернистых песчаников и алевролитов. Значение свиты в подземном хранении газа незначительно, в связи с чем детальное исследование фильтрационно-емкостных свойств ее пород не проводилось.

Орлинская свита представлена повсеместно песчаниками с высокими фильтрационно-емкостными свойствами. Свита является одним из контрольных горизонтов ПХГ. Кроме того, орлинские песчаники могут быть самостоятельным объектом хранения газа.

На рис. 3 приведен шлиф наиболее представительных пород (песчаник) орлинских отложений. Песчаник кварцевый, разнозернистый, высокопористый, без цемента. Обломочные зерна окатанные, сортированные. Контакты зерен точечные и линейные без вдавливания, растворения и регенерации. Поры множественные, сверхкапиллярные сообщающиеся, что способствует высокой проницаемости пород.

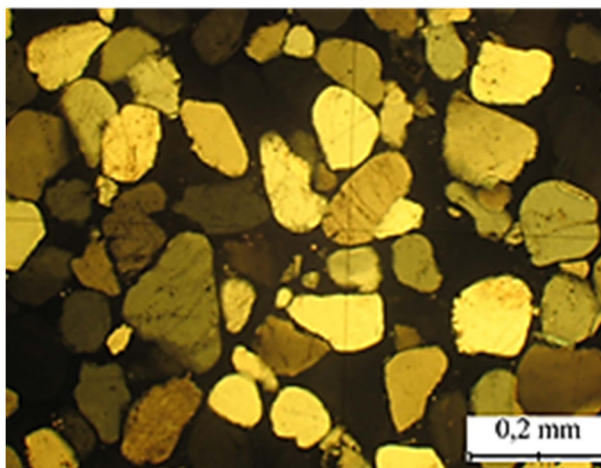


Рис. 3. Шлиф образца породы (песчаник) с глубины 890,11 м скважины 98 орлинских отложений

Fig. 3. Grinding of a rock sample (sandstone) from a depth of 890,11 m of the well 98 Orlin deposits

На рис. 3 представлен (шлиф образца породы, николи скрещены) песчаник кварцевый разнозернистый, от тонко- до мелкозернистого, высокопористый, без цемента. Обломки окатанные, сортированные. Контакты зерен точечные и линейные без вдавливания, растворения и регенерации. Поры множественные, равномерно распределенные, сверхкапиллярные сообщающиеся и редко капиллярные изолированные. Высокопористый песчаник.

В целом песчаники орлинских отложений обладают относительно высокой пористостью и проницаемостью (см. табл. 5, образец с глубиной 890,11 м) и могут быть с успехом использованы в качестве емкостей для хранения газа.

Таблица 5. Фильтрационно-емкостные параметры пород орлинской свиты из скважины 98**Table 5. Filtration-capacitive parameters of rocks of the Orlin formation from well 98**

Глубина, м	Плотность породы, г/см ³	Пористость, %		Проницаемость по азоту, мД
		общая	открытая	
889,88	2,47	14,4	6,0	0,80
890,11	2,23	18,6	15,0	450,00

В табл. 5 представлены результаты исследования образца породы, расположенного на границе орлинской свиты и ордовика (глубина 889,88 м). На контакте отложений порода (алевролит) представлена глинистым кварцевым минералом с высоким содержанием окислов алюминия, марганца и повышенным содержанием окиси железа, т. е. теми минералами, которые способствуют снижению пористости и проницаемости. Закрытость пор приводит к снижению открытой пористости и уменьшению проницаемости вплоть до самых низких значений, в данном случае – до 0,8 мД.

Заключение. В работе представлены обобщения результатов лабораторных исследований, в основном физических свойств образцов горных пород из скважин кембрийских отложений Прибугской структуры, установлены фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов и пород-покрышек, определены численные фильтрационно-емкостные характеристики исследуемых пород-коллекторов и пород-покрышек.

Значительное ухудшение фильтрационно-емкостных свойств пород нижнекембрийского пласта-коллектора ($\epsilon_{1str_{2-1}}$) в кровле отложений показывает, что, несмотря на простоту минерального состава пород-коллекторов, отмечается широкий спектр их фильтрационно-емкостных свойств, в основном по мощности отложений. Неравномерность в разбросе таких свойств породы оказывают форма зерен и особенности их упаковки в матрице, распределение цемента и характер катагенетических преобразований в постседиментационном процессе.

Алеврито-глинистые породы-покрышки часто характеризуются наличием в теле отложений участков с относительно повышенной пористостью и проницаемостью. Наличие таких участков пород в отложениях $\epsilon_{1str_{3-II}}$ основной газовой залежи объясняет наличие газа в пласте-покрышки. В целом алеврито-глинистые породы-покрышки имеют весьма низкую проницаемость вкрест напластования и повышенную в 8–10 раз – вдоль напластования.

В теле песчаников спановской свиты установлено наличие практически непроницаемых, не определяемых геофизическими методами исследования скважин, весьма маломощных пропластков пород, что обусловлено присутствием глинистых минералов в их составе и, в меньшей степени, уплотненной структурой порового пространства песчаников. Такие породы характеризуются весьма низкой проницаемостью, сравнимой с проницаемостью покрышки.

Орлинские песчаники обладают высокой пористостью и проницаемостью и могут быть использованы в качестве емкости для хранения газа.

Список использованных источников

1. Зиновенко, Г. В. Балтийско-Приднестровская зона перикратонных опусканий / под ред. Р. Г. Гарецкого. – Минск : Наука и техника, 1986. – 215 с.
2. Абраменко, В. И. Корреляция кембрийских отложений южной части Подляско-Брестской впадины / В. И. Абраменко, Г. В. Зиновенко, Л. В. Пискун // Докл. Акад. наук БССР. – 1989. – Т. 33, № 6. – С. 557–560.
3. Тектоника запада Восточно-Европейской платформы / под ред. Р. Г. Гарецкого – Минск : Наука и техника, 1990. – 168 с.
4. Левашкевич, В. Г. Вещественный состав и физические свойства горных пород нижнего кембрия и верхнего протерозоя Прибугской структуры Подляско-Брестской впадины / В. Г. Левашкевич // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2017. – № 1. – С. 89–98.
5. Кембрий Белоруссии / А. С. Махнач, В. И. Шкуратов, Г. В. Зиновенко, Л. В. Пискун ; под ред. акад. Акад. наук БССР Р. Г. Гарецкого. – Минск : Наука и техника, 1985. – 195 с.
6. Воскобойникова, Т. В. История геологического развития Прибугского поднятия Подляско-Брестской впадины в кембрии / Т. В. Воскобойникова // Літасфера. – 2003. - № 1(18). – С. 147–149.
7. Зиновенко, Г. В. Балтийская серия нижнего кембрия Прибугского поднятия и основные закономерности ее строения / Г. В. Зиновенко, Т. В. Воскобойникова // Літасфера. – 2007. – № 2 (27). – С. 115–120.
8. Шпак, С. Е. Геологическое строение и ёмкостные свойства нижнекембрийских отложений Прибугской локальной структуры и сопредельных территорий Подляско-Брестской впадины / С. Е. Шпак, Я. Г. Грибик // Літасфера. – 2018. – № 2 (49). – С. 34–53.

9. Санько, А. Ф. Стратиграфия отложений платформенного чехла Беларуси. Методические рекомендации по учебной дисциплине / А. Ф. Санько, С. А. Кручек. – Минск : БГУ, 2014. – 58 с.
10. Левашкевич, В. Г. Состав и физико-химические свойства пород-коллекторов спановской свиты Прибугской структуры Подляско-Брестской впадины / В. Г. Левашкевич, В. П. Самодуров, С. Е. Шпак // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 349–358.

References

1. Zinovenko G. V. *Baltiisko-Pridnestrovskaya zona perikratonnykh opuskanii* [Baltic-Dnestr zone of perikratonic sinkings]. Minsk, 1986, 215 p. (in Russian)
2. Abramenko V. I., Zinovenko G. V., Piskun L. V. *Corelacia cambriyskikh otlozheniy yuzhnoy chasti Podliasko-Bresckoy vpadiny* [Correlation of Cambrian sediments of the southern part of Podlesse-Brest depression]. *Doklady AN BSSR = Proceedings of the BSSR Academy of Sciences*, 1989, vol. 33, no. 6, pp. 557–560. (in Russian)
3. *Tectonika zapada Vostochno-Evropeiskoi platform* [Tectonics of the western part of East European platform]. Ed. by R. G. Garetsky. Minsk, 1990, 168 p. (in Russian)
4. Levashkevich V. G. *Veschestveny sostav i fizicheskie svoystva gornyh porod nizhnego cambria i verkhnego proterozoya Pribugskoy struktury Podliasko-Brestskoy vpadiny* [The material composition and physical properties of lower Cambrian and upper Proterozoic rocks of the Bug structure in the Podlesse-Brest depression]. *Vestsi Natsyonalnai akademii nauk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry Series*, 2017, no. 1, pp. 89–98. (in Russian)
5. Machnach A. S., Shkuratov V. I., Zinovenko G. V., Piskun L. V. *Kembrii Belorussii* [Cambrian of Belarus]. Ed. by acad. R. G. Garetsky. Minsk, 1985, 195 p. (in Russian)
6. Voskoboinikova T. V. *Istoria geologicheskogo razvitiya Pribugskogo podniatia Podliasko-Brestskoy vpadiny v cambrii* [History of geological development of the Bug uplift of the Podlesse-Brest depression in the Cambrian]. *Litasfera = Lithosphere*, 2003, no. 1(18), pp. 147–149. (in Russian)
7. Zinovenko G. V., Voskoboinikova T. V. *Baltiyskaya seria nizhnego cambria Pribugskogo podniatia i osnovnye zakonornosti eyo stroenia* [Baltic series of lower Cambrian Pribug raising and main regularities of its structure]. *Litasfera = Lithosphere*, 2007, no. 2 (27), pp. 115–120. (in Russian)
8. Shpak S. E., Gribik Y. G. *Geologicheskoe stroenie i yomcostnye svoystva nizhnecambriyskikh otlozheniy Pribugskoy localnoy struktury i sopredelnykh territoriy Podlasko-Brestskoy vpadiny* [Geological structure and capacitive properties of the lower Cambrian deposits of the Bug local structure and adjacent territories of the Podlesse-Brest depression], *Litasfera = Lithosphere*, 2018, no. 2 (49), pp. 34–53. (in Russian)
9. Sanko A. F., Kruchek S. A. *Stratigrafiya otlozhenij platformennogo chekhla Belarusi. Metodicheskie rekomendacii po uchebnoy discipline* [Stratigraphy of deposits of the platform cover of Belarus. Methodical recommendations on the academic discipline]. BSU, Minsk, 2014. 58 p. (in Russian)
10. Levashkevich V. G., Samodurov V. P., Shpak S. E. *Sostav i phisico-himicheskie svoystva porod-collectorov spanovskoy svity Pribugskoy struktury Podlasko-Brestskoy vpadiny* [The material composition and physical properties of reservoir-rocks of Span series of the Bug structure of the Podlesse-Brest depression]. *Vestsi Natsyonalnai akademii nauk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry Series*, 2018, no. 3, pp. 349–358. (in Russian)

Информация об авторе

Шпак Сергей Евгеньевич – ведущий геолог, Открытое акционерное общество «Газпром трансгаз Беларусь» (ул. Некрасова, 9, 220040, Минск, Беларусь). E-mail: style28@tut.by, siarhei.shpak@btg.by

Information about the author

Siarhei Ya. Shpak – Leading geologist, Open Joint Stock Company "Gazprom Transgaz Belarus" (9, Nekrasova, Str., Minsk, Belarus). E-mail: style28@tut.by, siarhei.shpak@btg.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-112-117>
УДК 552.08(375)

Поступила в редакцию 23.05.2022
Received 23.05.2022

ОБОСНОВАНИЕ ОБУСТРОЙСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ МОЗЫРСКОГО ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ГАЗА

В. В. Майоров¹, В. Г. Аусев¹, К. В. Парфенов², Н. Н. Луговский¹,
С. В. Красновский¹, А. А. Машезов¹, А. А. Лукашевич¹

¹Открытое акционерное общество «Газпром трансгаз Беларусь», Минск, Беларусь;

²Публичное акционерное общество «Газпром», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Обозначена актуальность и значимость подземных хранилищ газа для энергетической безопасности Республики Беларусь. Указаны типы ПХГ, находящиеся в эксплуатации на территории республики. Приведены геологические условия Мозырского соляного массива в районе расположения горных выработок одноименного подземного хранилища газа. Рассмотрены особенности строения соляной структуры. Приведена информация об отложениях каменной соли залесских слоев, пригодных для создания подземных резервуаров. Описаны горно-геологические условия и обозначены благоприятствующие факторы для создания в условиях Мозырского соляного купола подземного хранилища газа в отложениях каменной соли. Даны сведения об экранирующем эффекте перекрывающей соляную структуру толщи вышележащих пород. Выполнено математическое моделирование и дана оценка пригодности существующих горных выработок, определены их потенциальные эксплуатационные параметры и подтверждена долгосрочная устойчивость к воздействиям давлений, возникающих в процессе переоборудования существующих и создания новых подземных резервуаров для хранения природного газа, а также в процессе их эксплуатации (закачка-хранение-отбор). Приведены формулы для определения предельного максимального давления газа, допустимого максимального рабочего давления, а также минимально допустимого давления в подземном резервуаре и необходимого пролета горной выработки. Указан диапазон подбора испытательного давления для определения герметичности подземного резервуара. Определены условия по выбору минимального эксплуатационного давления в резервуаре, а также коэффициента запаса прочности в привязке к конкретным условиям. Фактически подтверждена пригодность и перспективность создания подземных хранилищ газа в соляных куполах Припятского прогиба.

Ключевые слова: природный газ; подземное хранилище газа; каменная соль; подземный резервуар; геомеханическое обоснование; моделирование; устойчивость горной выработки.

Для цитирования. Майоров В. В., Аусев В. Г., Парфенов К. В., Луговский Н. Н., Красновский С. В., Машезов А. А., Лукашевич А. А. Обоснование обустройства и эксплуатации Мозырского подземного хранилища газа // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 112–117.

SUBSTANTIATION OF THE ARRANGEMENT AND OPERATION OF THE MOZYR UNDERGROUND GAS STORAGE FACILITY

V. V. Mayorov¹, V. G. Ausev¹, K. V. Parfenov², N. N. Lugovskii¹,
S. V. Krasnovskii¹, A. A. Mashezau¹, A. A. Lukashevich¹

¹Joint Stock Company "Gazprom transgaz Belarus", Minsk, Republic of Belarus;

²Public Joint Stock Company "Gazprom", St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The relevance and importance of underground gas storages for the energy security of the Republic of Belarus is denoted. The types of underground gas storage facilities in operation on the territory of the republic are indicated. The geological conditions of the Mozyr salt massif in the area of the mine workings are given. The features of the structure of the Mozyr salt dome are considered. Information about the rock salt deposits of the Zalesky layers suitable for creating caverns is given. Mining and geological conditions are described and favorable factors of an underground gas storage creation in rock salt deposits under the conditions of the Mozyr salt dome are denoted. Information about the screening effect of the roof strata is given. Mathematical modeling was carried out and the assessment of the suitability of the existing salt caverns is given. During the conversion of existing and the creation of new caverns, as well as in the process of their operation (injection-storage-selection) long-term sustainability to the effects of pressures emerging has been confirmed. Formulas for determination the maximum gas pressure limit, the permissible maximum and minimum operating pressure as well as the required span of the cavern are given. The test pressure range for determining the tightness of the caverns is indicated. The conditions for choosing the minimum operating pressure in the cavern as well as the safety margin factor

in relation to specific conditions are determined. In fact, the suitability and prospects of creating underground gas storage facilities in the salt domes of the Pripyat trough have been confirmed.

Keywords: natural gas; underground gas storage; rock salt; salt cavern; geomechanical substantiation; modeling; stability of salt cavern.

For citation. Mayorov V. V., Ausev V. G., Parfenov K. V., Lugovski N. N., Krasnovski S. V., Mashezau A. A., Lukashevich A. A. Substantiation of the arrangement and operation of the Mozyr underground gas storage facility. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 112–117.

Введение. Устойчивая работа топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь, наряду с другими факторами, в значительной мере зависит от надежности функционирования системы газоснабжения. Система газоснабжения представляет собой совокупность взаимосвязанных технологических объектов: добычи газа (находящихся за пределами республики), систем транспорта газа, подземных хранилищ газа (ПХГ) и распределительных сетей. Основная задача системы газоснабжения – непрерывная подача потребителям необходимого количества природного газа с заданными физико-химическими показателями.

Важнейшей составной частью системы газоснабжения являются ПХГ, которые позволяют оптимизировать эксплуатацию газотранспортной системы, снизить суточную и сезонную неравномерность ее загрузки и обеспечить бесперебойное снабжение газом потребителей.

Одним из важнейших направлений для достижения указанной цели является создание и развитие ПХГ в отложениях каменной соли, обладающих целым рядом преимуществ в компенсации пикового потребления по сравнению с ПХГ, созданными в пористых пластах геологических структур [1]. Хранилища в отложениях соли также допускают эксплуатацию подземных резервуаров в мультициклическом режиме с чередованием закачки и отбора газа по несколько периодов в год, высокую производительность по отбору газа при соизмеримом объеме его хранения [2].

В Республике Беларусь имеется два ПХГ в пористых пластах (Осиповичское и Прибугское), развивается ПХГ (Мозырское) в отложениях каменной соли (рис. 1). Мозырское ПХГ ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» расположено в Мозырском районе Гомельской области. В географическом отношении описываемая территория расположена в восточной части Полесской низменности на правом берегу р. Припяти, а орографически – на Мозырской возвышенности – конечно-моренной гряде днепровского оледенения.



Рис. 1. Общий вид на площадку Мозырского подземного хранилища газа

Fig. 1. General view of the Mozyr underground gas storage

Геологические условия Мозырского соляного массива в районе ПХГ. Участок недр в пределах Мозырского ПХГ приурочен к восточной части Мозырской солянокупольной структуры, представляющей собой криптодиопир, сформированный процессами соляной тектоники [3, 4]. Расположение площадки ПХГ во взаимоотношении со структурной и топографической схемами Мозырской соляной структуры показано на рис. 2.

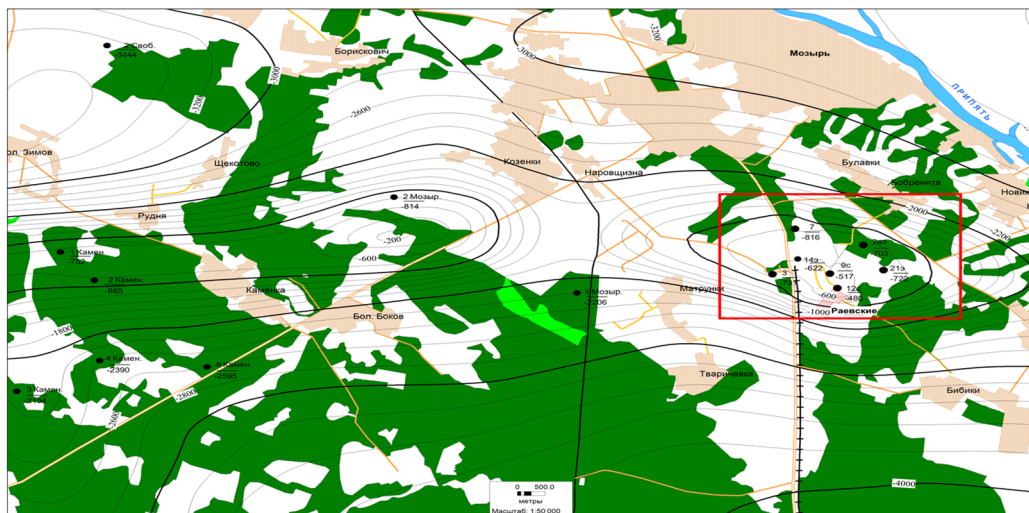


Рис. 2. Расположение площадки Мозырского ПХГ в пределах Мозырской площадки (площадка выделена красным контуром)

Fig. 2. Location of the Mozyr underground gas storage within the Mozyr area (plot outlined in red)

Тело соляной структуры характеризуется низким содержанием несоляных прослоев, способствующих созданию качественных, преимущественно изометричных полостей в соли объемом до 800 тыс. м³, в которых может храниться более 100 млн м³ активного объема газа [3]. Кровля Мозырской соляной структуры в пределах площадки располагается на глубинах 600–700 м, а мощность ее соляных пород превышает 2000 м. Основные объекты хранения газа (соляные каверны, емкости) расположены в верхнесоленосных образованиях девонских отложений. В пределах сводовой части солянокупольной структуры по изогипсе –950 м мощность отложений чистой соли залесских слоев, пригодных для создания выработок, составляет не менее 1200 м. Геофизическими исследованиями установлено отсутствие тектонических нарушений в соляной структуре, способных быть путями миграции (утечки) газа из соляных емкостей.

Размеры подземных резервуаров, которые можно создавать в условиях Мозырского соляного купола, главным образом определяются горно-геологическими условиями с учетом технических и технологических возможностей, ожидаемых затрат и издержек при их создании. Горно-геологические условия в данном районе весьма благоприятны как по мощности соляных отложений, так и по горизонтальному простиранию.

Часть соляной толщи от свода создаваемой выработки до поверхности галитовой подтолщи позволяет надежно экранировать залежь ПХГ от утечки газа, так как галит является одним из самых надежных флюидоупоров. Планируемая мощность соли над соляной выработкой в пределах структуры позволяет выдержать значительные перепады давлений (от 2,7 до 16,7 МПа в зависимости от конкретных условий), возникающие в процессе создания и эксплуатации подземных резервуаров, а также при закачке и отборе газа.

Еще более усиливает экранирующий эффект перекрывающая соляную структуру мощная стрешинско-пермская толща, состоящая из частого чередования песчано-карбонатно-глинистых, глинистых, глинисто-карбонатных, часто опесчаненных прослоев [4]. Такое чередование способствует улучшению экранирования газовой залежи за счет перестройки фильтрационного (файлюационного) потока на каждой границе на пути возможной миграции (движения) флюида вверх (рис. 3).

Результаты геологических и геофизических исследований указывают на пригодность Мозырского соляного массива к созданию в его пределах подземных резервуаров значительных объемов. Имеются перспективы для наращивания объемов соляных емкостей.

Уже в 2008 г. в Мозырское ПХГ начата пробная закачка газа в соляные полости. В настоящее время Мозырское ПХГ расширяется. Производится строительство подземных резервуаров с помощью новых пробуренных скважин, а также продолжается переоборудование горных выработок с отработанными запасами каменной соли. Для хранения газа переоборудовано 15 подземных резервуаров, что позволило довести объем оперативного резерва газа всех ПХГ ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» до 1090 млн м³, а максимальную суточную производительность обеспечить в объеме 34 млн м³.

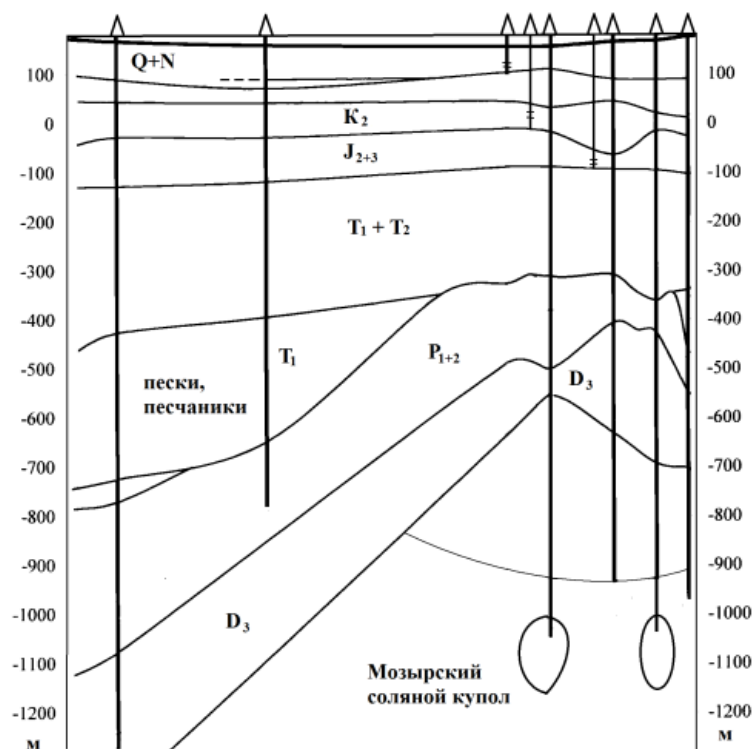


Рис. 3. Схематичный геологический разрез через Мозырский соляной купол с изображением скважин и мест расположения соляных емкостей

Fig. 3. Schematic geological section through the Mozyr salt dome showing wells and locations of salt reservoirs

Исследование подземных резервуаров. Оценка пригодности каждого подземного резервуара (горной выработки) для хранения газа, определение их потенциальных эксплуатационных параметров (объем, допустимые максимальные и минимальные давления и др.), а также расчетов долгосрочной устойчивости к воздействиям внешних и внутренних давлений, возникающих в процессе переоборудования подземного резервуара или его эксплуатации выполнена путем математического моделирования [5, 6].

Предельно максимальное давление газа (P_{\max}) определяется горным давлением на уровне башмака эксплуатационной колонны подземного резервуара и вычисляется по формуле

$$P_{\max} = \rho_r g (H_k - h), \text{ Па}, \quad (1)$$

где ρ_r – усредненная плотность горных пород, залегающих выше башмака эксплуатационной колонны подземного резервуара, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; H_k – глубина кровли подземной выработки, м; h – длина необсаженной части ствола скважины («шеи» резервуара), м.

Длина необсаженной части ствола скважины при размыве подземных резервуаров может составлять от нуля до нескольких десятков метров. Плотность горных пород для условий Мозырского соляного купола принимается равной 2200 кг/м^3 .

Допустимое максимальное рабочее давление (P_{\max}^3) для подземного резервуара устанавливается с некоторым запасом в зависимости от конкретных горно-геологических условий по формуле

$$P_{\max}^3 = K P_{\max}, \text{ Па}, \quad (2)$$

где K – коэффициент надежности по нагрузке, принимаемый равным 0,85 – при спокойном или пластово-линзовидном залегании соли, когда надсолевая толща представлена непроницаемыми породами, и 0,75 – в остальных случаях.

Испытательное давление ($P_{\text{и}}$) для определения герметичности подземного резервуара и, следовательно, пригодности его для хранения газа должно выбираться из диапазона по формуле

$$P_{\max} > P_{\text{и}} > P_{\max}^3, \text{ Па}. \quad (3)$$

В соответствии с положениями ТКП 127-2008 «Правила создания и эксплуатации подземных хранилищ газа в отложениях каменной соли» [7] испытательное давление должно составлять $1,05 P_{\max}^3$.

Минимально допустимое давление на уровне кровли подземного резервуара (P_{\min}) и допустимый пролет горной выработки в зависимости от минимального эксплуатационного давления определяется по более сложной зависимости (4) с учетом напряженно-деформированного состояния массива соли:

$$P_{\min} = (\rho_r g H_k) - \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{C+1}{C} \sigma_i^\infty \right), \text{ Па}, \quad (4)$$

где C и σ_i^∞ – параметры напряженно-деформированного состояния массива каменной соли.

Минимальное эксплуатационное давление в резервуаре (P_{\min}^3) принимается выше (P_{\min}) с коэффициентом запаса (k), значение которого больше единицы.

Значение коэффициента k должно приниматься в зависимости от конкретных условий (состояния потолочины резервуара, длины необсаженной части ствола скважины резервуара, протяженности целика соли над башмаком эксплуатационной колонны и т. п.).

Допустимый пролет на уровне потолочины резервуара (l) в зависимости от принятого минимального эксплуатационного давления может быть определен из выражения

$$l = \sqrt[3]{\left(\frac{V_{adm}}{\alpha} \left(\frac{\sigma_i^\infty}{\rho_r g H_k - P_{\min}^3} \right) W \right)}, \text{ м}, \quad (5)$$

где V_{adm} – допустимый объем области запредельного деформирования в окрестностях кровли, м^3 . В практике сооружения подземных резервуаров принято считать, что для обеспечения устойчивости кровли резервуара допустимый объем запредельного деформирования не должен превышать 700 м^3 ; α и W – безразмерные параметры.

Заключение. В результате проведенных расчетов каждая система скважина-подземный резервуар была испытана на герметичность. Для каждого резервуара определены допустимые максимальные и минимальные эксплуатационные давления, обеспечивающие длительную устойчивость выработки при циклической эксплуатации. Полученные результаты позволили предложить и реализовать конструктивные особенности эксплуатационных скважин, технологии их строительства и эксплуатации, обеспечившие высокую надежность и безопасность эксплуатации подземных резервуаров.

Правильность решения поставленной задачи доказана многолетней успешной и безопасной практикой опытной эксплуатации Мозырского ПХГ.

Таким образом, показано, что в пределах Мозырского соляного криптодиапира возможно создание подземных резервуаров значительных объемов с сохранением долгосрочной устойчивости к воздействию рабочих давлений в процессе эксплуатации. Размеры соляной структуры позволяют наращивать количество таких емкостей и значительно увеличивать объемы хранения газа в пределах Мозырского ПХГ.

Список использованной литературы

1. Войтов, П. М. Развитие подземных хранилищ газа в Республике Беларусь / П. М. Войтов, Н. Н. Луговский, Н. А. Криштопа // Газовая промышленность. – 2015. – № 9. – С. 22–24.
2. Хлопцов, В. Г. Подземные хранилища природного газа в отложениях каменной соли / В. Г. Хлопцов // Газовая промышленность. – 2015. – № 9. – С. 28–31.
3. Конищев, В. С. Соляная тектоника Припятского прогиба / В. С. Конищев. – Минск, 1975. – 150 с.
4. Геология Беларуси / А. С. Махнач [и др.]. – Минск : Институт геологических наук НАН Беларуси, 2001. – 815 с.
5. Повышение надежности и безопасности эксплуатации подземных хранилищ газа, созданных в отложениях каменной соли / В. Г. Аусев [и др.] // Промышленная безопасность. – 2022. – № 3. – С. 36–39.
6. Казарян, В. А. Подземное хранение газов и жидкостей / В. А. Казарян. – М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2019. – Т. 1 : Проектирование. Строительство. – 844 с.
7. Правила создания и эксплуатации подземных хранилищ газа в отложениях каменной соли = Правілы стварэння і эксплуатацыі падземных сховішчаў газу ў адкладах каменнай солі : ТКП 127-2008 (02230). – Введ. 15.10.2008 (с изм. № 1. Введ. 21.03.2011). – Минск : Минэнерго Республики Беларусь, 2008. – 98 с.

References

1. Voitov P. M., Lugovski N. N., Krishtopa N. A. *Razvitie podzemnykh hranilishch gaza v Respublike Belarus* [Development of underground gas storage facilities in the Republic of Belarus]. *Gazovaya promyshlennost = Gas Industry*, 2015, no. 9, pp. 22–24. (in Russian)
2. Khloptsov V. G. *Podzemnie hranilishcha prirodnogo gaza v otlozheniyakh kamennoi soli* [Underground gas storage in rock salt caverns]. *Gazovaya promyshlennost = Gas Industry*, 2015, no. 9, pp. 28–31. (in Russian)
3. Konishchev V. S. *Solyanaya tektonika Pripyatskogo progiba* [Salt tectonics of the Pripyat trough]. Minsk, 1975, 150 p. (in Russian)
4. Makhnach A. S., Garetsky R. G., Matveev A. V. [et al.] *Geologiya Belarusi* [Geology of Belarus]. Minsk, Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, 2001, 815 p. (in Russian)
5. Ausev V. G., Lugovski N. N., Krasnovski S. V., Mashezau A. A., Lukashevich A. A. *Povyshenie nadezhnosti i bezopasnosti ekspluatatsii podzemnykh hranilishch gaza, sozdannykh v otlozheniyakh kamennoi soli* [Improving the reliability and safety of operation of underground gas storage facilities created in rock salt caverns]. *Promyshlennaya bezopasnost = Industrial Safety*, 2022, no. 3, pp. 36–39. (in Russian)
6. Kazaryan V. A. *Podzemnoe hranenie gazov i zhidkostey. Tom 1. Proektirovanie. Stroitelstvo* [Underground storage of gases and liquids. Vol. 1. Design. Construction]. Moscow ; Izhevsk, Institute of Computer Research, 2019, 844 p. (in Russian)
7. ТКР 127-2008 (02230) : *Pravila sozdaniya i ekspluatatsii podzemnykh hranilishch gaza v otlozheniyakh kamennoi soli* [Technical code 127-2008 (02230). Rules for creation and maintenance of underground gas storages in rock salt deposits]. Minsk, Ministry of Energy of the Republic of Belarus, 2008, 98 p. (in Russian)

Информация об авторах

Майоров Владимир Владимирович – генеральный директор, ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» (ул. Некрасова, 9, 220040, г. Минск, Беларусь). E-mail: vladimir.maierov@btg.by

Аусев Владимир Георгиевич – главный инженер – первый заместитель генерального директора, ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» (ул. Некрасова, 9, 220040, г. Минск, Беларусь). E-mail: v.ausev@btg.by

Парфенов Кирилл Викторович – заместитель начальника Управления, начальник отдела Департамента ПАО «Газпром» (ул. Стартовая, д. 6 лит. Д, к. 708/2, 196210, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: k.parfenov@adm.gazprom.ru

Луговский Николай Николаевич – заместитель главного инженера – начальник производственного отдела подземного хранения газа, ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» (ул. Некрасова, 9, 220040, г. Минск, Беларусь). E-mail: nikolay.lugovski@btg.by

Красновский Сергей Викторович – заместитель начальника производственного отдела подземного хранения газа, ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» (ул. Некрасова, 9, 220040, г. Минск, Беларусь). E-mail: s.krasnouski@btg.by

Машезов Алексей Анурбиевич – ведущий инженер-технолог производственного отдела подземного хранения газа, ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» (ул. Некрасова, 9, 220040, г. Минск, Беларусь). E-mail: aleksei.mashezov@btg.by

Лукашевич Антон Антонович – начальник службы стандартизации, ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» (ул. Некрасова, 9, 220040, г. Минск, Беларусь). E-mail: a.lukashevich@btg.by

Information about the authors

Vladimir V. Mayorov – General Director, Joint Stock Company "Gazprom transgaz Belarus" (Nekrasova Str., 9, 220040, Minsk, Belarus). E-mail: vladimir.maierov@btg.by

Vladimir G. Ausev – Chief Engineer, First Deputy General Director, Joint Stock Company "Gazprom transgaz Belarus" (Nekrasova Str., 9, 220040, Minsk, Belarus). E-mail: v.ausev@btg.by

Kirill V. Parfenov – Deputy Head of Directorate, Head of Division of the Department of PJSC "Gazprom" (Star-tovaya Str., 6 lit. D, room 708/2, 196210, Str. Petersburg, Russian Federation). E-mail: k.parfenov@adm.gazprom.ru

Nikolay N. Lugovski – Deputy Chief Engineer, Head of Underground Gas Storage Department, Joint Stock Company "Gazprom transgaz Belarus" (Nekrasova Str., 9, 220040, Minsk, Belarus). E-mail: nikolay.lugovski@btg.by

Sergey V. Krasnovski – Deputy Head of Underground Gas Storage Department, Joint Stock Company "Gazprom transgaz Belarus" (Nekrasova Str., 9, 220040, Minsk, Belarus). E-mail: s.krasnouski@btg.by

Aliaksei A. Mashezau – Leading Technologist of Underground Gas Storage Department, Joint Stock Company "Gazprom transgaz Belarus" (Nekrasova Str., 9, 220040, Minsk, Belarus). E-mail: aleksei.mashezov@btg.by

Anton A. Lukashevich – Head of the Standardization Service, Joint Stock Company "Gazprom transgaz Belarus" (Nekrasova Str., 9, 220040, Minsk, Belarus). E-mail: a.lukashevich@btg.by

**ГЕОТЕХНОЛОГИИ. ДОБЫЧА, ПЕРЕРАБОТКА
И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ**
*GEOTECHNOLOGY. EXTRACTION, PROCESSING
AND THE USE OF SOLID FUEL MINERALS*

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-118-124>
УДК 662.813:732

Поступила в редакцию 04.04.2022
Received 04.04.2022

**УТИЛИЗАЦИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ
ПИРОЛИЗОМ В КОМПОЗИЦИЯХ С ТОРФОМ**

И. И. Лиштван, В. М. Дударчик, В. М. Крайко, Е. В. Ануфриева

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Во всем мире наблюдается интенсивный рост производства полимеров. Ежегодно промышленность потребляет более 150 млн т пластмасс, из которых 85 % являются термопластами и 15 % термореактивными полимерами. По оценкам специалистов потребление пластика в мире возросло до 1 т/год на человека, что существенно обострило проблему утилизации и повторного использования их отходов. В большинстве стран по - прежнему главным способом обращения с такими отходами является захоронение – самый экологически неблагоприятный вариант, связанный как с безвозвратной потерей материала и энергии, так и постепенным выделением токсичных отравляющих веществ (диоксины, фураны). Менее распространено сжигание отходов с утилизацией получаемой тепловой энергии, которое связано с необходимостью эффективной очистки дымовых газов от токсичных продуктов горения, что очень затратно.

В качестве перспективного направления утилизации полимерсодержащих отходов использован пиролиз смесевых комбинаций торфа с требующими переработки полимерами. Выбраны пробы подлежащих утилизации полимерных отходов, наиболее представительных и типичных для республики, с последующим приготовлением на их основе смесевых композиций в различных дозовых сочетаниях компонентов с двумя видами торфа (верховым и низинным), проведена их термодеструкция при различных условиях пиролиза и составлен материальный баланс полученных продуктов. Оценен качественный и количественный состав продуктов пиролиза на примере газовой фазы. Подтверждена эффективность способа утилизации смесевых композиций с получением более калорийных продуктов термодеструкции. Выявлено, что глубина конверсии смесевых композиций существенно зависит от условий пиролиза и состава исходных компонентов.

Предложен способ утилизации полимерных отходов пиролизом торфополимерных композиций, позволяющий получать в качестве энергоносителя фракцию смолы с более высоким выходом и пиролизный газ с существенно большей теплотой сгорания, что дает основание рассматривать его в качестве высокоэффективного энергоносителя при получении тепловой и электрической энергии. Ценность получаемого твердого остатка пиролиза состоит в возможности использования его в качестве как строительного материала, так и в перспективе, сырья для изготовления различных сорбентов.

Ключевые слова: торф; полимерсодержащие отходы; пиролиз; термодеструкция; смесевые композиции; смола; пиролизный газ; теплота сгорания.

Для цитирования. Лиштван И. И., Дударчик В. М., Крайко В. М., Ануфриева Е. В. Утилизация полимерных отходов пиролизом в композициях с торфом // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 118–124.

UTILIZATION OF POLYMER WASTE BY PYROLYSIS IN COMPOSITIONS WITH PEAT

I. I. Lishtvan, V. M. Dudarchik, V. M. Kraiko, E. V. Anufrieva

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

Abstract. There is an intensive growth of polymer production all over the world. Annually, the industry consumes more than 150 million tons of plastics 85 %, of which are thermoplastics and 15 % thermosetting polymers. According to experts, the consumption of plastics in the world has increased to 1 t/year per person, which has significantly exacerbated the problem of recycling and reuse of such waste underground disposal is the most environmentally unfavorable option associated with both the irretrievable loss of material and energy, and the gradual release of toxic substances (dioxins, furans). Less common is the energy, which is associated with the need for effective purification of flue gases from toxic combustion products, which is very costly.

Pyrolysis is used as a prospective direction of polymer-containing waste recovery mixed combinations of peat with polymers requiring processing. The most representative and typical for the republic samples of polymer waste to be disposed of, were selected, followed by the preparation of mixed compositions based on them in various combinations of components with two types of peat (top and lowland), their thermal degradation was carried out under various pyrolysis conditions and the material balance of the products obtained was compiled. The qualitative and quantitative composition of pyrolysis products are estimated on the example of the gas phase. The efficiency of the method of utilization of mixed compositions with the production of more high-calorie thermal degradation products has been confirmed. It is revealed that the conversion depth of mixed compositions significantly depends on the pyrolysis conditions and the composition of the initial components.

A method of utilization of polymer waste by pyrolysis of peat polymer compositions is proposed, which allows obtaining a resin fraction with a higher yield and pyrolysis gas with a significantly higher heat of combustion as an energy carrier, which gives reason to consider it as a highly efficient energy carrier in the production of thermal and electrical energy. The value of the resulting solid pyrolysis residue consists in the possibility of using it as both a building material and, in the future, raw materials for the manufacture of various sorbents.

Keywords: peat; polymer-containing waste; pyrolysis; thermal degradation; mixed compositions; resin; pyrolysis gas; heat of combustion.

For citation. Lishtvan I. I., Dudarchik V. M., Kraiko V. M., Anufrieva E. V. Utilization of polymer waste by pyrolysis in compositions with peat. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 118–124.

Введение. В последнее время во всем мире наблюдается рост производства полимеров. Например, ежегодно различными отраслями промышленности потребляется более 150 млн т пластических масс, из них: 85 % термопластов и 15 % термореактивных полимеров. По некоторым данным, в последнее время в развитых странах потребление пластика возросло до 1 т/год на человека. В этих условиях с каждым годом обостряется проблема утилизации и повторного использования отходов полимеров [1–5].

В большинстве стран главным путем решения проблемы полимерных отходов по-прежнему является захоронение – самый экологически неблагоприятный вариант, означающий безвозвратную потерю ценных материалов и энергии. Хотя полимеры и являются достаточно инертными компонентами мусора, они также постепенно разрушаются, выделяя опасные для живых организмов вещества, в том числе токсичные соединения (диоксины и фураны).

Менее распространено сжигание отходов с утилизацией получаемой тепловой энергии. Однако оно связано с необходимостью эффективной очистки дымовых газов от токсичных продуктов горения. Установлено, что при сжигании основных многотоннажных видов пластика выделяется дым с размерами частиц от 0,4 до 10,0 мкм. Часть из них, включая летучие оксиды металлов, проходит через фильтры систем пылегазоочистки и развевается по воздуху. При сгорании полимерных изделий (ковров, губок, пенопластов, упаковочных материалов, труб и др.) выделяются оксиды азота, серы, хлористый водород, при соединении которых с атмосферной влагой формируются кислотные дожди, губительные для зеленого мира. При сгорании некоторых пластика образуется зола, содержащая тяжелые металлы, которые распыляются воздухом по большой территории. Такая зола приносит большой вред при вдыхании, приводя к легочным отравлениям. До недавнего времени в Японии почти 80 % муниципальных отходов сжигали с получением тепловой и электрической энергии, однако из-за выделения огромного количества тепла и высокой температуры пламени мусоросжигательные устройства быстро выходят из строя.

Менее негативное воздействие на окружающую среду оказывают материальные (химические, механические, термические) способы переработки полимерных отходов. Использование вторичного сырья

в качестве новой ресурсной базы – одно из наиболее динамично развивающихся направлений переработки полимерных материалов в мире.

Химическая переработка полимерных отходов – это деполимеризация с получением исходных мономеров, включая аммонолиз, гликолиз, метанолиз, гидролиз. Продукты деполимеризации отходов повторно используют для получения полимеров, пластификаторов, лаков, материалов для покрытий и др.

Механический рециклинг, например в случае ПЭФ-бутылок, наиболее приемлемый, не требующий дорогостоящего оборудования способ [6].

Цель работы – разработать способы и приемы 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.

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 газообразным или жидким сырьем для промышленности органического синтеза, газообразным или жидким топливом, углеродными адсорбентами 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 табл. 1 представлена структура полимерных отходов, выделенных из твердых бытовых отходов (ТБО), и оценена примерная доля отдельных компонентов в общей массе.

Таблица 1. Примерная структура полимерных отходов

Table 1. Approximate structure of polymer waste

Тип полимерного материала	Доля в общей массе полимерных отходов, мас.%
Полиэтилен низкой плотности	40–50
Полиэтилен высокой плотности	10–15
Полипропилен	3–5
Поливинилхлорид	10–15
Полистирол	5–7
Полиэтилентерефталат	12–15
Прочие материалы	7–20

Результаты и их обсуждение. В настоящей работе в качестве перспективного направления утилизации полимерных отходов выбран пиролиз смесевых комбинаций отходов твердых горючих ископаемых с требующими переработки полимерными отходами и, в частности, формирование торфополимерных композиций с разным соотношением исходных ингредиентов и определением оптимальных сочетаний.

На основании изучения структуры полимерных отходов, выделенных из ТБО, способов обращения с ними и оценки примерной доли отдельных компонентов в общей массе нами выбраны следующие наиболее часто встречающиеся образцы для испытаний, характеристики которых представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристика выбранных для испытаний образцов полимерных отходов

Table 2. Characteristics of polymer waste samples selected for testing

Образец	Цвет	Массовая доля в ТБО, %	Международное обозначение
Полиэтилен низкой плотности	Синий	40–50	LDPE
Полиэтилен высокой плотности	Темно-красный	10–15	HDPE
Полиэтилентерефталат	Зеленый	12–15	PET
Поливинилхлорид	Грязно-белый	10–15	PVC
Полистирол	Желтый	5–7	PS
Полипропилен	Белый, непрозрачный	3–5	PP

В качестве исходных ингредиентов использованы пробы верхового торфа месторождения Славное со степенью разложения 20 % (магелланикум-торф), пробы низинного торфа месторождения Туршовка и образцы полимерных отходов, представленные в табл. 2.

Термодеструкция смесевых композиций проведена на установке стационарного пиролиза при различных выбранных параметрах – температуре и соотношении компонентов. Качество получающихся продуктов пиролиза (смола, твердый остаток и пиролизный газ) оценено по их составу, балансу и энергетическим характеристикам (теплота сгорания газа). Методика приготовления образцов для исследования заключалась в следующем: влажный торф пропускали через шнековый аппарат и высушивали до воздушно-сухого состояния. Торфополимерные композиции готовили путем механического смешивания подготовленного торфа с измельченными образцами (до 2–4 мм) полимера до однородного состава. Исходный торф и полученные смеси подвергали в дальнейшем термическому разложению до температуры 700 °С при средней скорости нагрева примерно 8 °С/мин.

Результаты исследований представлены в табл. 3–6.

Итак, целевыми продуктами пиролиза выбранных смесевых составов являются смола и пиролизный газ. Есть также сведения, что коксозольный остаток может быть сырьем для получения специальных продуктов особого назначения, а именно селективных сорбентов, к примеру, на радионуклиды. Однако в данной работе указанные вопросы не рассматриваются.

Результаты, представленные в табл. 3, показывают, что пиролиз торфополимерной смеси приводит к значительному изменению материального баланса: увеличивается содержание смолы при незначительном снижении выхода пирогенетической воды. Этот факт можно объяснить частичным разложением полимеров при данных условиях пиролиза с последующими процессами полимеризации получаемых продуктов и переводом их в жидкую фракцию.

Как видно из табл. 3, добавление в пиролизуемую торфополимерную смесь 10 % полиэтилентерефталата увеличивает выход смолы сразу на одну четверть (с 15 до 19 %), добавление 15 % полимера на сухую навеску торфа повышает выход смолы на 50 %, а при внесении PET в количестве 20 % дополнительный выход смолы составляет около 80 %. Такой значительный рост выхода смолы можно объяснить протекающими при пиролизе процессами термодеструкции полимера, в результате чего образуются более низкомолекулярные фракции, конденсирующиеся совместно с основными фракциями смолы торфа.

Добавка к исходному торфу полиэтилена, полистирола или поливинилхлорида также во всех случаях увеличивает выход смолы, но в относительно меньшей степени.

Определенной зависимости выхода пиролизного газа от содержания и типа добавляемого полимера не обнаружено. Гораздо важнее тот факт, что химический анализ пиролизного газа, в особенности такой его суммарный показатель, как теплота сгорания, однозначно свидетельствует о существенно более высоких ее показателях у газа, образующегося из торфополимерных композиций, причем превышение достигает 40 %. Значит, качество такого газа как энергоносителя существенно выше (табл. 4).

Таблица 3. Выход продуктов термического разложения пробы верхового торфа месторождения Славное с добавками полимеров при температуре 700 °С

Table 3. Yield of thermal decomposition products of a sample of the top peat of the Slavnoye deposit with polymer additives at temperature 700 °С

Состав пиролизной смеси		Жидкие продукты		Коксозольный остаток	Пиролизный газ
Полимерная добавка	% на сухую навеску	смола + вода	смола		
Исходный торф ($W = 10,4 \%$, $A^c = 1,5 \%$)		36,9	15,0	33,3	29,8
PVC	10	39,5	18,7	36,5	24,0
PS	10	37,0	23,0	32,9	30,1
HDPE	10	37,9	21,9	35,0	27,1
PP	10	36,1	22,0	35,3	28,6
LDPE	10	40,2	20,7	39,7	20,1
PET	10	35,2	18,9	33,9	30,9
PET	15	37,9	23,9	34,3	27,8
PET	20	38,5	27,6	33,8	27,6

Таблица 4. Состав газа пиролиза пробы торфа месторождения Славное с добавками полимеров при температуре 700 °C

Table 4. Composition of pyrolysis gas of the peat sample of the Slavnoye deposit with polymer additives at temperature 700 °C

Состав пиролизной смеси		Состав газа пиролиза, об. %					Плотность газа, г/л	Теплота сгорания газа, ккал/нм ³
Полимерная добавка	% на сухую навеску	CO ₂	C _n H _m	CO	H ₂	CH ₄		
Исходный торф		58,4	0,9	19,6	9,5	11,6	1,5045	1954
PP	10	44,2	1,1	22,0	16,5	16,2	1,2558	2627
LDPE	10	55,7	0,6	20,1	11,1	12,5	1,4591	2045
HDPE	10	53,0	3,1	20,2	9,8	13,9	1,4533	2482
PS	10	35,7	0,9	20,3	28,5	14,6	1,1029	2719
PVC	10	47,3	1,3	19,9	17,2	14,2	1,3208	2438
PETE	10	39,7	0,9	22,3	19,6	17,6	1,2190	2804
PETE	15	47,8	0,7	20,6	17,1	13,8	1,3263	2340
PETE	20	43,4	1,6	21,6	17,4	16,0	1,2809	2690

Таблица 5. Выход продуктов термического разложения пробы низинного торфа месторождения Туршовка с добавками полимеров при температуре 700 °C

Table 5. Yield of thermal decomposition products of a sample of Turshovka field lowland peat with polymer additives at temperature 700 °C

Состав пиролизной смеси		Жидкие продукты		Коксозольный остаток	Пиролизный газ
Полимерная добавка	% на сухую навеску	смола + вода	смола		
Исходный торф (W = 9,1 %, A ^c = 15,4 %)		22,0	17,4	47,9	30,0
PP	10	25,1	22,3	45,1	29,9
LDPE	10	23,4	22,9	44,9	31,8
HDPE	10	24,5	23,7	46,6	28,8
PS	10	28,5	26,1	44,3	27,2
PVC	10	22,3	16,4	47,9	29,8
PET	10	27,4	22,9	45,8	26,9
Среднее значение (10 %) из шести значений		25,8	22,9	45,2	29,0

Таблица 6. Состав газа пиролиза пробы торфа месторождения Туршовка с добавками полимеров при температуре 700 °C

Table 6. Composition of pyrolysis gas of Turshovka peat sample with polymer additives at temperature 700 °C

Состав пиролизной смеси		Состав газа пиролиза, об. %					Плотность газа, г/л	Теплота сгорания газа, ккал/нм ³
Полимерная добавка	% на сухую навеску	CO ₂	C _n H _m	CO	H ₂	CH ₄		
Исходный торф		44,5	0,8	17,2	23,9	13,6	1,2247	2407
PP	10	45,4	0,8	16,9	20,4	16,5	1,2564	2555
LDPE	10	46,0	1,0	22,4	22,3	8,3	1,2828	2102
HDPE	10	35,6	1,9	16,3	26,7	19,5	1,0210	3107
PS	10	42,4	2,0	24,7	15,3	15,6	1,3016	2752
PVC	10	46,5	1,7	15,3	21,8	14,7	1,2595	2514
PET	10	45,6	1,3	18,3	19,9	14,9	1,2732	2518
Среднее значение (10 %) из шести значений		43,3	1,4	19,2	20,9	15,1	1,2336	2608

Таким образом, применение в виде добавки к торфу полимерных отходов в количестве 10–20 мас.% позволяет значительно увеличить теплоту сгорания пиролизного газа и, как следствие, повысить его энергетическую ценность, что дает основание рассматривать газ в качестве высокоэффективного энергоносителя при получении тепловой и электрической энергии.

Из результатов исследований, представленных в табл. 5 и 6, видно, что выявленные закономерности по выходу смолы и качеству пиролизного газа пиролизуемых смесевых составов (торф + полимер) для верхового торфа месторождения Славное в полной мере подтверждаются и для низинного торфа

месторождения Туршовка, что указывает на универсальность обнаруженного явления. Следует также указать, что суммарный подсчет продуктов выхода из исходного торфа и торфополимерных композиций указывает на тенденцию к более высокой степени конверсии процесса пиролиза в последнем случае.

Заключение. Таким образом, проведенные 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 и 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 этом случае образуются газ, который можно использовать как топливо непосредственно в процессе утилизации, и твердый остаток, который вкпе с введением в смесевую композицию соли металла-катализатора позволяет получать спектр селективных сорбционных материалов для очистки водных объектов, включая радиоактивные. Кроме этого, конечной целью процесса является утилизация полимерных отходов.

Список использованных источников

1. Ольхов, А. А. Способы утилизации отходов полимеров / А. А. Ольхов, С. В. Власов, А. Л. Иорданский // Пластические массы. – 1998. – № 3. – С. 14–18.
2. Обращение с отходами производства и потребления / Х. Н. Зайнуллин [и др.]. – Уфа : Диалог, 2005. – 202 с.
3. Зезин, А. Б. Полимеры и окружающая среда / А. Б. Зезин // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 2. – С. 57–64.
4. Родионов, А. И. Техника защиты окружающей среды / А. И. Родионов, В. Н. Клушик, Н. С. Торочешников. – М. : Химия, 1989. – 270 с.
5. Шериева, М. Л. Биоразлагаемые композиции на основе крахмала / М. Л. Шериева, Г. Б. Шустов, Р. А. Шетов // Пластические массы. – 2004. – № 10. – С. 29–31.
6. Прокопчук, Н. Р. Рециклинг и утилизация полимерных отходов / Н. Р. Прокопчук, В. Т. Липик. – Минск : БГТУ, 2008. – 289 с.

References

1. Ol'hov A. A., Vlasov S. V., Iordanskij A. L. *Sposoby utilizacii othodov polimerov* [Methods for recycling waste polymers] *Plasticheskie massy = Plastic masses*, 1998, no. 3, pp. 14–18. (in Russian)
2. Zajnullin H. N., Abdrahmanov R. F., Ibatullin U. G., Minigazimov I. N., Minigazimov I. S. *Obrashchenie s othodami proizvodstva i potrebleniya* [Production and consumption waste management]. Ufa, 2005, 202 p. (in Russian)
3. Zezin A. B. *Polimery i okruzhayushchaya sreda* [Polymers and the Environment]. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal = Soros Educational Journal*, 1996, no. 2, pp. 57–64. (in Russian)
4. Rodionov A. I., Klushik V. N., Torocheshnikov N. S. *Tekhnika zashchity okruzhayushchej sredy* [Environmental Protection Engineering]. Moscow, 1989, 270 p. (in Russian)
5. Sherieva M. L., Shustov G. B., Shetov R. A. *Biorazлагаемые композиции на основе крахмала* [Biodegradable compositions based on starch]. *Plasticheskie massy = Plastic masses*, 2004, no. 10, pp. 29–31. (in Russian)
6. Prokopchuk N. R., Lipik V. T. *Recikling i utilizaciya polimernyh othodov* [Recycling and disposal of polymer waste] Minsk, 2008, 289 p. (in Russian)

Информация об авторах

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

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

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

Vladimir M. Dudarchyk – 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: vvkraiko@gmail.com

Alena V. Anufrieva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-125-135>
УДК 662:547-31/39+543.635

Поступила в редакцию 25.03.2022
Received 25.03.2022

ПОДБОР И ХАРАКТЕРИСТИКА ТОРФЯНОГО И РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОЦИДНЫХ ПРЕПАРАТОВ

Г. В. Наумова, Н. А. Жмакова, Н. Л. Макарова, Т. Ф. Овчинникова,
А. А. Макеенко, Ю. Ю. Навоша, Л. П. Калилец

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Сфагновый мох и образующийся на его основе торф оцениваются специалистами как экологически чистый сырьевой ресурс для разработки новых эффективных лекарственных средств, поскольку в их составе содержится широкий набор биологически активных соединений разных классов: полисахариды, уроновые кислоты, флавоноиды, фенокарбоновые кислоты, альдегиды, кумарины, тритерпеновые соединения, органические кислоты, минеральные соли, а в торфе еще и гуминовые вещества. Объектом исследования являлись сфагнум-магелланикум и сфагнум-фускум торф и четыре образца сфагнового мха: *Sph. magellanicum*, *Sph. fuscum*, *Sph. angustifolium* и *Sph. apiculatum*, которые в дальнейшем предполагается использовать в качестве сырья для получения препаратов биоцидного действия. Выполнена геоботаническая и физико-химическая характеристика отобранных образцов. Все они характеризуются низкой зольностью (1,32–3,59 %), высоким содержанием органических веществ, а их активная кислотность лежит в пределах 3,8–4,4 единицы, что характерно для верхового торфа сфагнового типа и сфагновых мхов. На ИК-спектрах всех образцов наблюдаются полосы поглощения, обусловленные валентными и деформационными колебаниями гидроксильных, карбоксильных, карбонильных, амидных и других функциональных групп углеводов, фенолов, спиртов, органических кислот, сложных эфиров алифатического и ароматического характера, характерных для растений-торфообразователей и верховых торфов низкой степени разложения. Установлено, что образцы сфагновых мхов и сфагнового торфа, являются лабильным гемицеллюлозосодержащим сырьем, количество легкогидролизуемых полисахаридов в мхах достигает 55 %, в торфах – 45 % от органического вещества. Содержание редуцирующих веществ в гидролизатах гемицеллюлоз мхов – 55–59 %, торфа – 53–54 %. Массовая доля целлюлозы в органическом веществе сфагновых мхов – 23–26 %, торфа – 22–24, гуминовых веществ 17,7–20,9 %. Во всех образцах присутствуют небольшие количества (0,8–2,3 %) экстрактивных веществ, извлекаемых органическими растворителями, и «лигнин» (7,1–13,0 %). Литературные данные, а также выполненные спектральная и химическая характеристики выбранных образцов показали, что среди биологически активных веществ, обнаруженных в их составе, наибольший интерес представляют полисахаридный и фенольный комплексы, поскольку фармакологические свойства сфагновых мхов и торфа малой степени разложения можно связать с наличием этих соединений.

Ключевые слова: сфагновый торф; сфагновые мхи; физико-химические свойства; спектральная характеристика; компонентный состав.

Для цитирования. Наумова Г. В., Жмакова Н. А., Макарова Н. Л., Овчинникова Т. Ф., Макеенко А. А., Навоша Ю. Ю., Калилец Л. П. Подбор и характеристика торфяного и растительного сырья для получения биоцидных препаратов // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 125–135.

SELECTION AND CHARACTERIZATION OF PEAT AND PLANT MATERIALS FOR BIOCIDAL PREPARATIONS

G. V. Naumova, N. A. Zhmakova, N. L. Makarova, T. F. Ovchinnikova,
A. A. Makeenko, Yu. Yu. Navosha, L. P. Kalilets

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

Abstract. Sphagnum moss and peat formed on its basis is estimated by experts as ecologically pure raw material resource for development of new effective medicines as their structure contains a wide set of biologically active compounds of different classes: polysaccharides, uronic acids, flavonoids, phenocarboxylic acids, aldehydes, coumarins, triterpene compounds, organic acids, mineral salts, and in peat also humic substances. The objects of the study were sphagnum magellanicum and sphagnum fuscum peat and 4 samples of sphagnum moss: *Sph. magellanicum*, *Sph. fuscum*, *Sph. angustifolium* and *Sph. apiculatum* which in the future is supposed to be used as a raw material for preparation of biocidal agents. The geobotanical and physico-chemical characteristics of the selected samples was carried out. All of them are

characterized by low ash content (1.32–3.59 %), high content of organic substances and their active acidity is within the range 3.8–4.4 units, which is typical for sphagnum-type raised peat and sphagnum moss. In the infrared spectra of all samples observed absorption bands due to valence and strain vibrations of hydroxyl, carboxyl, carbonyl, amide and other functional groups of carbohydrates, phenols, alcohols, organic acids, esters of aliphatic and aromatic nature, typical for plants-peat formers and upper peats of low degree of decomposition. It has been established that samples of sphagnum mosses and sphagnum peat are labile hemicellulose-containing raw materials; the amount of easily hydrolyzable polysaccharides in mosses reaches 55 %, in peats – 45 % of organic matter. The content of reducing substances in hydrolysates of hemicelluloses of mosses is 55–59 %, that of peat is 53–54 %. The mass fraction of cellulose in the organic matter of sphagnum mosses is 23–26 %, in peat 22–24, in humic substances 17.7–20.9 %. All samples contain small amounts (0.8–2.3 %) of extractive substances extracted by organic solvents and 7.1–13.0 % of lignin. Literature data, as well as the performed spectral and chemical characteristics of the selected samples showed that among the biologically active substances found in their composition, the most interesting are polysaccharide and phenolic complexes, since the pharmacological properties of sphagnum mosses and low-degradation peat can be attributed to the presence of these compounds.

Keywords: sphagnum peat; sphagnum mosses; physicochemical properties; spectral characteristics; component composition.

For citation. Naumova G. V., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F., Makeenko A. A., Navosha Yu. Yu., Kalilets L. P. Selection and characterization of peat and plant materials for biocidal preparations. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 125–135.

Введение. Целебные свойства торфа издавна известны. Многолетняя практика применения торфа в бальнеологии, физиотерапии, ветеринарии, а также использование в качестве сырья для получения биологически активных препаратов, способных интенсифицировать процессы микробного синтеза, регулировать обменные процессы у животных и растений, повышать их иммунитет и продуктивность, свидетельствует о многоплановом действии соединений, содержащихся в торфе, на живые организмы [1–3].

Большой научный интерес представляет сфагновый торф, который образуется на верховых болотах на основе сфагновых мхов. Сфагновые мхи – типичные представители растений-торфообразователей месторождений верхового типа, являются богатым источником биологически активных веществ различной химической природы. В процессе торфообразования биологически активные вещества растений-торфообразователей либо аккумулируются в торфе, либо подвергаются микробному и химическому воздействию и служат источником более устойчивых химических соединений вторичного химического и микробного синтеза.

Специфика торфообразовательного процесса заключается в распаде наименее устойчивых органических компонентов болотной растительности, в первую очередь углеводов, и накоплению более устойчивых веществ различных химических классов. При формировании сфагнового торфа в болотной среде изменяется соотношение биологически активных веществ в его составе в сравнении с их содержанием в материнском веществе сфагновых мхов, но многие из них не только сохраняются, но и аккумулируются, что позволяет расценивать малоразложившийся сфагновый торф как источник биологически активных веществ растительного происхождения. В аспекте химического состава сфагновый торф проявляет особое родство со своим уникальным генетическим предшественником – сфагновым мхом. В составе мха сфагнум и сфагнового торфа содержатся: полисахариды различного строения, в том числе пектиновые вещества, включающие уроновые кислоты; природные фенольные соединения, такие как флавоноиды, фенолкарбоновые кислоты, альдегиды, кумарины, флавоны, пигменты, а также смолы, тритерпеновые соединения, органические кислоты, минеральные соли и др. Кроме этого в составе торфа появляется новая группа биологически активных соединений, отсутствующих в растительном сырье – гуминовые вещества [4–7].

Широкий спектр органических и минеральных составляющих, содержащихся в сфагновых мхах и торфе, открывает потенциальные возможности их использования во многих сферах, в том числе в фармакологии, бальнеологии, физиотерапии, ветеринарии и медицине [8, 9].

Литературные данные о биологической активности экстрактов из растений рода сфагнум указывают на их многостороннее, комплексное действие на организм. Препараты на их основе обладают высокой биологической активностью, низкой токсичностью при минимуме побочных эффектов, что вызывает большой интерес у исследователей, разрабатывающих новые лекарственные средства [10, 11].

Сфагновый мох и образующийся на его основе торф оцениваются специалистами как экологически чистый сырьевой ресурс для разработки новых высокоэффективных лекарственных средств. Поэтому исследования химического состава сфагнового торфа и мхов представляются важной научной задачей.

Материалы и методы исследований. Объектами исследований являлись четыре образца сфагнового торфа (два образца сфагнум магелланикум и два образца сфагнум фускум) и четыре образца сфагнового мха: *Sph. magellanicum* (сфагнум магелланикум) и *Sph. fuscum* (сфагнум фускум), *Sph. angustifolium* (сфагнум ангустифолиум), *Sph. apiculatum* (сфагнум апикулятум).

Ботаническая характеристика проб торфа, включающая определение ботанического состава, вида торфа в соответствии с ботанической классификацией и степени его разложения, выполнена в лаборатории использования и охраны торфяных и сапропелевых месторождений. Ботанический анализ торфа заключался в определении под микроскопом в отмытых от гумуса растительных волокнах процентного содержания остатков различных видов растений-торфообразователей.

Сущность метода определения активной кислотности заключалась в приготовлении водной торфяной суспензии и потенциометрическом измерении в ней величины pH. Навеску образца, отобранную по объему, помещали в стеклянный стакан вместимостью 100 см³ и добавляли дистиллированную воду, не содержащую углекислоты, в количестве, соответствующем 2,5 объема по отношению к взятому объему образца торфа или мха. После тщательного перемешивания суспензии стеклянной палочкой стакан накрывали стеклом и оставляли на 4–5 ч. По истечении указанного времени суспензию вновь перемешивали, измеряли величину pH с помощью pH-метра или иономера. Значение кислотности фиксировали на приборе с точностью до 0,02 pH. Окончательные результаты испытания пробы округляли до десятых долей pH. За результат анализа выбирали среднее арифметическое результата двух определений.

Определение массовой доли влаги торфа и мхов проводили в соответствии с действующим типовым методом. При определении влаги торфа и подсушенного до воздушно-сухого состояния мха пробу измельчали путем растирания в яшмовой ступке, просеивали через сито с размером ячеек 0,25 мм. В бюксы отбирали пробы массой 1,5–2,0 г и взвешивали с точностью до 0,0002 г. Подготовленные материалы высушивали в сушильном шкафу при температуре 105–110 °С до постоянной массы и вычисляли в процентах потери массы взятой навески.

Метод определения массовой доли золы заключался в полном сжигании навески образца торфа или мха в муфельной печи при температуре 800 ± 25 °С и прокаливании зольного остатка до постоянной массы при той же температуре. Зольность определяли по процентному соотношению массы остатка, образующегося при прокаливании, к общей массе взятого образца. Массовую долю органического вещества образца определяли как разность сухого вещества и золы.

Образцы торфов и мхов исследовали методом инфракрасной спектrophотометрии с преобразованием Фурье (FTIR) (прибор IR Prestige-21, Япония). Регистрацию ИК-спектров проводили по стандартной методике запрессовок в таблетки с KBr.

Групповой химический состав органической части образцов исследовали по методике, принятой для оценки химического состава верхового торфа низкой степени разложения, что позволило охарактеризовать их по содержанию битумов, водорастворимых, легкогидролизующихся, трудногидролизующихся, гуминовых веществ, «лигнина» – негидролизующего остатка, а также составляющих его углеводного комплекса, в том числе редуцирующих веществ [12]. По аналогичной методике анализировали сфагновые мхи, учитывая только, что они не содержат в своем составе гуминовых веществ. При определении группового химического состава в качестве исходного брали две параллельные навески каждого образца, которые обезбитуминировали, вычисляя при этом содержание в нем сырого торфяного воска, а остаток служил для дальнейшей работы и использовался для выделения водорастворимых, потом легкогидролизующихся веществ методом кислотного гидролиза, а затем гуминовых и трудногидролизующихся веществ (целлюлоза).

Гуминовые кислоты выделяли из навески, оставшейся после выделения гемицеллюлоз, трехкратной обработкой 0,1 н. раствором едкого натра при соотношении торф : жидкость 1 : 150 при температуре 80–90 °С в течение 1 ч. Фильтраты соединяли, подкисляли соляной кислотой до pH 1,0–2,0, осадок вымораживали в течение двух суток при температуре –5 °С, отделяли от фильтрата, промывали дистиллированной водой до исчезновения ионов хлора в промывных водах (проба с азотнокислым серебром) и высушивали на воздухе. В растворе при обработке гуматов соляной кислотой оставались фульвокислоты, содержание которых также определяли.

Результаты исследований и их обсуждение. На болотах Беларуси произрастает более 30 видов сфагновых мхов. Господствующими среди других видов являются *Sph. magellanicum* (сфагнум магелланикум) и *Sph. fuscum* (сфагнум фускум), образующие сплошной покров верховых месторождений торфа. Широкое распространение имеют также *Sph. angustifolium* (сфагнум ангустифолиум), *Sph. apiculatum* (сфагнум апикулятум), *Sph. balticum* (сфагнум балтикум), *Sph. rubenium* (сфагнум рубениум), *Sph. cuspidatum* (сфагнум кусpidатум) и др.

Важной задачей настоящих исследований являлся подбор торфяного и растительного сырья, наиболее пригодного для получения на его основе препаратов биоцидного действия.

Подбор сырья проводили на торфопредприятии ОАО «Туршовка» Крупского района Минской области и ПУ «Витебскторф» Витебской области, где по данным предыдущих геологоразведочных работ имеются участки верхового торфа, в том числе с невысокой степенью разложения. Фрезерный фускум-торф (2 пробы) отбирали из штабелей на поле 8а, участках 8 и 9 торфопредприятия ОАО «Туршовка» Минской области.

Магелланикум-торф (две пробы) отобран специалистами лаборатории биогеохимии и агроэкологии на участке торфомассива «Сидень», поле 4, карты 3 и 10 ПУ «Витебскторф» Витебской области. Результаты ботанических исследований образцов приведены в табл. 1, из которой видно, что отобранные образцы представлены торфом верхового типа сфагновой группы и характеризуются низкой степенью разложения.

Таблица 1. Ботаническая характеристика образцов торфа

Table 1. Botanical characteristics of peat samples

Номер образца	Место отбора	Ботанический состав, %	Процент содержания	Вид	Степень разложения
1	ПУ «Витебскторф» Витебской области, участок торфомассива «Сидень», поле 4, карта 3	Пушица Сфагнум магелланикум Сфагнум ангустифолиум Сфагнум фускум Сфагнум куспидатум Сфагнум балтикум	10 55 10 15 5 5	Сфагнум магелланикум	10
2	ПУ «Витебскторф» Витебской области, участок торфомассива «Сидень», поле 4, карта 10	Пушица Сфагнум магелланикум Сфагнум ангустифолиум Сфагнум фускум Сфагнум куспидатум	5 60 10 20 5	Сфагнум магелланикум	10
3	ОАО «Туршовка» Минской области, участок 8, поле 9	Пушица Сфагнум магелланикум Сфагнум ангустифолиум Сфагнум фускум Сфагнум куспидатум Сфагнум апикуляту	5 20 5 60 5 5	Сфагнум фускум	10
4	ОАО «Туршовка» Минской области, участок 1, поле 9	Пушица Сфагнум магелланикум Сфагнум ангустифолиум Сфагнум фускум Сфагнум куспидатум	5 25 10 55 5	Сфагнум фускум	10

В ботаническом составе образцов № 1 и 2 преобладали остатки магелланикум-мха. В образце № 1 они составляли 55 %, в образце № 2 – 60 % от суммы, остатки сфагнум фускум – 15 и 20 % соответственно, сфагнум ангустифолиум – по 10 % в обоих образцах, мочажинных мхов – сфагнум куспидатум и сфагнум балтикум – по 5 %. В составе торфов присутствовали также остатки пушицы – 10 и 5 % соответственно.

Образцы № 3 и 4 по своему ботаническому составу относились к фускум-торфу. Содержание остатков данного мха в составе образца № 3 – 60 %, № 4 – 55 %, магелланикум-мха – 20 и 25 % соответственно, сфагнум ангустифолиум – 5 и 10 %, мочажинных мхов сфагнум куспидатум, сфагнум балтикум, также как и остатки пушицы – по 5 %. Таким образом, два отобранных образца относились к магелланикум-торфу, два – к фускум-торфу. Степень разложения всех образцов была одинаковой и составляла 10 %.

На нативном торфяном месторождении «Туршовка-Чертово» были отобраны четыре вида сфагнового мха: грядовые – сфагнум магелланикум (образец № 5), сфагнум фускум (образец № 6), сфагнум ангустифолиум (образец № 7); мочажинный мох сфагнум апикуляту (образец № 8).

Фрезерный торф в штабелях в летний сезон высыхает естественным образом до воздушно-сухого состояния. Образцы фускум-торфа, отобранные из штабелей, находились в воздушно-сухом состоянии. Магелланикум-торф, отобранный из залежи, и образцы сфагновых мхов высушивали до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре.

Была выполнена физико-химическая характеристика всех образцов торфа и мхов (табл. 2). Как видно из полученных экспериментальных данных, массовая доля влаги образцов магелланикум-торфа, отобранного из залежи и высушенного в лаборатории до воздушно-сухого состояния, находилась в пределах 38,2–39,4 %. Образцы фускум-торфа, отобранного из штабелей, имели разную влажность, в одном из них содержание влаги составляло 28,2 %, в другом – 46,5 %.

По содержанию минеральных веществ образцы существенно не различались. Более низкий уровень золы отмечен у образцов торфа, содержание минеральных веществ в них составляло 1,32–1,86 % от сухого вещества. Сфагновые мхи имели немного более высокий уровень содержания минеральных веществ – от 2,26 до 3,59 %.

Таблица 2. Физико-химическая характеристика исходных проб торфа и мха

Table 2. Physical and chemical characteristics of initial samples of peat and moss

Номер образца	Вид торфа или мха	Массовая доля				pH
		влаги, %	сухого вещества, %	зола, %	органического вещества, % в СВ	
1	Магелланикум-торф	38,2	61,8	1,32	98,68	4,0
2		39,4	60,6	1,54	98,46	4,1
3	Фускум-торф	28,2	71,8	1,86	98,24	4,4
4		46,5	53,5	1,63	98,37	4,2
5	Магелланикум-мох	15,1	84,9	2,64	97,36	3,9
6	Фускум-мох	15,2	84,8	2,26	97,74	4,0
7	Ангустифолиум-мох	15,0	85,0	3,59	96,41	4,0
8	Апикулятум-мох	14,3	85,7	2,95	97,05	3,8

Все образцы торфа и мха имели кислую реакцию среды. Уровень pH торфа находился в пределах 4,0–4,4, образцы мха были еще более кислыми, и их показатель pH составлял 3,8–4,0.

Таким образом, исследование физико-химических свойств сфагнового торфа и мхов показало, что они характеризовались низкой зольностью (1,32–3,59 %), высоким содержанием органических веществ, а их активная кислотность лежала в пределах 3,8–4,4 единицы, что характерно для верхового торфа сфагнового типа и растений-торфообразователей этого торфа.

Для получения дополнительных данных о химических соединениях, входящих в состав образцов торфа и мха, методом инфракрасной спектrophотометрии получены их спектральные характеристики (см. рисунок).

ИК-спектры исследованных образцов близки между собой и содержат практически идентичный набор полос поглощения. На спектрах всех образцов наблюдается интенсивная полоса поглощения с максимумом около 3400 см^{-1} , обусловленная валентными колебаниями гидроксильных групп алифатического и ароматического характера (ν_{OH}) – валентные колебания фенолов, спиртов, воды), связанных водородными связями. Наличие этих же, а также карбоксильных функциональных групп в структуре анализируемых образцов торфа и мхов определяет и поглощение в области $1280\text{--}1240\text{ см}^{-1}$ ($\nu_{\text{C=O}}$), валентные колебания C–O карбоксильных групп, спиртов, сложных эфиров, ($\delta_{\text{O-H}}$), деформационные колебания связей O–H спиртов и фенолов.

В области $3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$ на фоне широкой полосы поглощения гидроксильных групп наблюдаются довольно интенсивные полосы поглощения валентных колебаний CH_2 , CH_3 ($\nu_{\text{CH}_2, \text{CH}_3}$) групп с максимумами при 2920 и 2850 см^{-1} , которые обусловлены валентными колебаниями групп углеводных, углеводородных, ароматических, алифатических и других соединений. К этим группам относятся и полосы поглощения 1460 см^{-1} (плечо) и 1380 см^{-1} – симметричные и асимметричные деформационные колебания углерод-водородных связей ($\delta_{\text{CH}_2, \text{CH}_3}$).

В спектрах всех образцов регистрируется интенсивная полоса поглощения с максимумом при 1720 см^{-1} ($\nu_{\text{C=O}}$), обусловленная валентными колебаниями C=O связей в свободных карбоксильных группах и других соединений, содержащих карбонильные группы (моносахариды, альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты, ангидриды, амиды).

Поглощение при 1597 см^{-1} (плечо) и четко разрешенная полоса на 1508 см^{-1} ($\nu_{\text{C=C}}$) обусловлены валентными колебаниями ненасыщенных углеродных связей ароматических соединений (пульсационные колебания углеродного скелета).

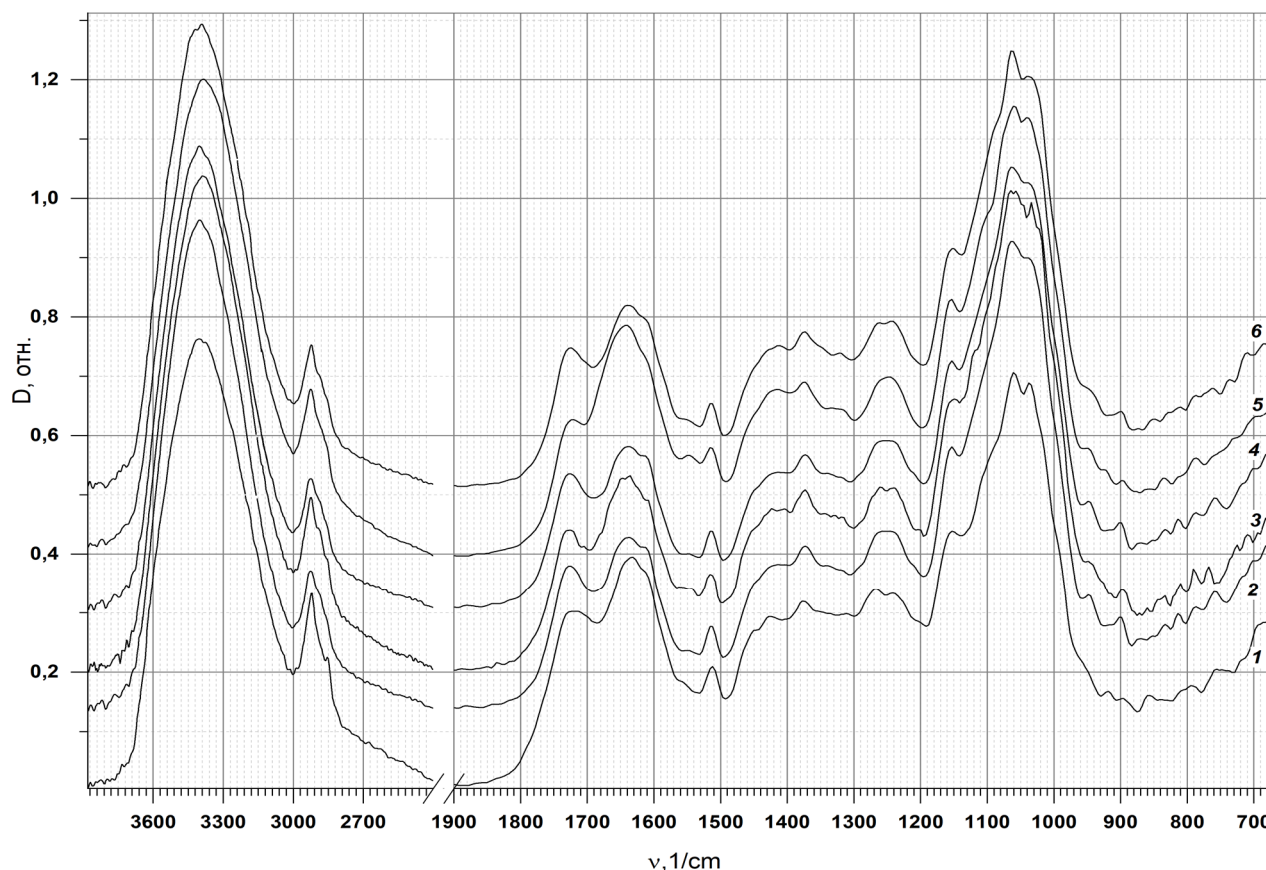


Рис. 1. ИК-спектры исследуемых образцов сфагнового торфа и сфагновых мхов:
1 – торф сфагнум магелланикум; 2 – торф сфагнум фускум; 3 – мох сфагнум магелланикум;
4 – мох сфагнум фускум; 5 – мох сфагнум ангустифолиум; 6 – мох сфагнум апикулятум

Fig. 1. IR spectra of the examined samples of sphagnum peat and sphagnum mosses:
1 – sphagnum magellanicum peat; 2 – sphagnum fuscum peat; 3 – sphagnum magellanicum moss;
4 – sphagnum fuscum moss; 5 – sphagnum angustifolium moss; 6 – sphagnum apiculatum moss

Полосы поглощения при 1420 см^{-1} (ν_{COO^-}) связаны с симметричными валентными колебаниями COO -связей и ($\delta_{\text{O-H}}$) деформационными колебаниями O-H -связей фенолов и спиртов.

Полосы поглощения при $1157, 1122, 1060, 1030\text{ см}^{-1}$ ($\nu_{\text{C-OH}}$) обусловлены валентными колебаниями спиртовых гидроксильных C-OH групп углеводов, циклических и алифатических эфиров, а при 1650 см^{-1} – ($\nu_{\text{C=O}}$) – валентными колебаниями первичных амидов, при $1625\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ – деформационными колебаниями C=C -связей ($\delta_{\text{C=C}}$) и ассиметричными валентными колебаниями ионов COO^- (ν_{COO^-}) первичных аминов, а также валентными колебаниями воды ($\nu_{\text{H}_2\text{O}}$). Полосы поглощения при 1550 см^{-1} связаны с валентными колебаниями (ν_{COO^-}) вторичных аминов.

Спектры с таким набором полос поглощения и таким соотношением по интенсивности характерны для торфов низкой степени разложения, а также исходных торфообразователей. Так, наличие полос в области 2920 и 2850 см^{-1} и их соотношение по интенсивности с поглощением в области 1600 см^{-1} указывает на преобладание ненасыщенных фрагментов в структуре образцов, а неразрешенность полос свидетельствует о присутствии наборов соединений, содержащих указанные группы. Наличие полосы свободных карбоксильных групп при 1720 см^{-1} свидетельствует о низкой минерализации образцов торфа, что свойственно для торфов верхового типа. Сильная полоса в области $1150\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ указывает на высокое содержание ненарушенных углеводных компонентов – характерное свойство для торфов низкой степени разложения и исходных торфообразователей.

Наиболее полной характеристикой торфяного сырья является групповой химический состав, который дает представление о содержании в нем основных групп органических компонентов и при этом

позволяет судить о превращениях углеводного комплекса торфа в процессе его разложения, о накоплении гуминовых веществ, а также оценить уровень содержания наиболее устойчивых его органических компонентов – битумов и негидролизуемого остатка или «лигнина», которые химически устойчивы и очень незначительно изменяется в процессе микробиологического разложения.

Результаты исследования битуминозности, содержания углеводных компонентов, гуминового комплекса торфов, негидролизуемого остатка, рассчитанного с учетом вклада остальных компонентов в органическое вещество образцов магелланикум-торфа, фускум-торфа и сфагновых мхов, представлены в табл. 3.

На первой стадии из исследуемых образцов выделяли фракции битумов (бензином). Битумы представляют собой смесь смоляных и жирных кислот, их триглицеридов, а также эфиров высокомолекулярных жирных спиртов, включающих остатки жирных и смоляных кислот.

Таблица 3. Групповой химический состав отобранных образцов сфагнового торфа и сфагновых мхов

Table 3. Group chemical composition of selected samples of sphagnum peat and sphagnum mosses

Вид сырья	Содержание компонентов, % на органическую массу							
	Торф (R = 10 %)				Мох			
	магелланикум		фускум		магел- ланикум	фус- кум	ангустифо- лиум	апику- лятум
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 1	Образец № 2				
Битумы	2,3	2,1	1,9	1,8	1,8	1,3	1,6	0,8
Водорастворимые вещества, в том числе редуцирующие вещества в них	5,6 1,4	5,8 1,5	6,5 1,8	6,1 1,6	6,9 1,7	7,8 2,2	7,1 1,9	9,6 3,5
Легкогидролизуемые вещества, в том числе редуцирующие вещества в них	42,9 22,9	44,0 24,1	43,4 23,3	45,1 24,4	51,6 30,5	53,2 29,9	51,7 28,8	54,7 32,4
Трудногидролизуемые веще- ства, в том числе редуцирующие вещества в них	23,9 22,1	21,3 20,5	22,6 21,9	21,7 21,1	26,8 25,3	24,4 24,2	26,6 25,5	23,3 22,9
Сумма гидролизуемых ве- ществ, в том числе редуцирующие вещества в них	72,4 46,4	71,1 46,1	72,5 46,0	72,9 47,1	85,3 57,3	85,4 56,3	85,4 56,2	87,6 59,8
Гуминовые вещества, в том числе:	18,2	20,9	17,7	19,5	–	–	–	–
гуминовые кислоты	11,8	13,8	12,2	12,8	–	–	–	–
фульвовые кислоты	6,4	7,1	6,5	6,7	–	–	–	–
негидролизуемый остаток «лигнин»	7,1	8,0	7,9	7,6	12,9	13,3	13,0	11,6

Сфагновые мхи и торф малой степени разложения бедны битумами. На их долю у изучаемых образцов мхов магелланикум и ангустифолиум приходилось 1,6 %, мха фускум – 1,3, а у мха апикулятум – 0,8 % от массы органических веществ. Изучаемые сфагновые торфа содержали несколько больше данных компонентов, поскольку эти соединения являются химически и микробиологически устойчивыми и относительно накапливаются в процессе торфообразования. В составе органической массы магелланикум-торфа содержание битумов составляло 2,1–2,3 %, фускум-торфа – 1,8–1,9 %.

Наиболее лабильными составляющими торфа и любого растительного сырья являются водорастворимые вещества, способные переходить в жидкую фазу при его длительной обработке горячей водой. Исследуемые сфагновые торфа низкой степени разложения характеризовались невысоким выходом водорастворимых веществ. Их содержание в органической массе исследуемых торфов составляло 5,6–6,5 %. В грядовых мхах – магелланикум, фускум и ангустифолиум, присутствие этих соединений несколько выше – 6,9; 7,8 и 7,1 % соответственно, а в мочажинном апикулятум мхе еще выше – 9,6 %. Водорастворимые соединения представлены моносахаридами, аминокислотами, органическими кислотами, аминами и рядом других химических соединений, растворимых в горячей воде. Следует отметить, что водорастворимые вещества включали в свой состав значительное количество редуцирующих сахаров (растворимые вещества), их доля в массе этих соединений для торфов и грядовых мхов составляла 24–28 %, а для мочажинного апикулятум-мха значительно выше – более 36 %.

Одним из ценных компонентов органического вещества верхового торфа и растений-торфообразователей является углеводный комплекс, представленный легкогидролизуемыми и трудногидролизуемыми веществами; первые из них включают преимущественно гемицеллюлозу, а вторые – целлюлозу. Содержание гидролизуемых веществ в торфах зависит от их вида и степени разложения. Углеводами среди разных видов торфа наиболее богат сфагновый торф низкой степени разложения, при этом чем меньше степень разложения торфа, тем выше в нем содержание полисахаридов. В еще большей мере полисахариды различного строения содержатся в предшественниках сфагнового торфа – сфагновых мхах, произрастающих на торфяных месторождениях верхового типа. Выбранные образцы верхового малоразложившегося торфа и сфагновых мхов характеризовались высоким содержанием полисахаридов различной степени полимеризации.

В таком лабильном сырье, как растения-торфообразователи, преобладали легкогидролизуемые полисахариды. Как видно из полученных данных, наибольшее количество легкогидролизуемых углеводов содержал мочажинный апикулятум-мох – 54,7 %, грядовые мхи – магелланикум, фускум и ангустифолиум также богаты гемицеллюлозами, доля которых в органической массе составляла 51,6; 53,2 и 51,7 % соответственно. Магелланикум и фускум торф несколько беднее этими соединениями по сравнению с растениями-торфообразователями, но содержание гемицеллюлоз в них также было значительным и составляло 43–45 %.

Как и следовало ожидать, целлюлоза (трудногидролизуемые вещества) также в разных количествах входит в состав растительных тканей и торфов. В групповом химическом составе органического вещества грядовых сфагновых мхов целлюлоза составляла 24,4–26,8 %, мочажинного апикулятум-мха – 23,3 %. Близким содержанием трудногидролизуемых веществ отличались образцы исследуемого торфа (21,3–23,9 %). Достаточно высокое содержание трудногидролизуемых веществ в торфах обусловлено незначительной степенью гумификации торфяного сырья ($R = 10$ %), в процессе которой происходит микробиологическая деградация целлюлозы, а также высоким содержанием этих соединений в химическом составе материнского вещества (биомасса сфагновых мхов).

Под воздействием гидролизующих агентов полисахариды торфа деструктируют до низкомолекулярных соединений, представленных в основном моносахаридами, благодаря наличию альдегидной группы обладающими редуцирующими свойствами. Альдегидные группы содержат не только моносахариды (альдозы) торфа, но и продукты их превращения – фурановые альдегиды, гуминоподобные вещества, низкомолекулярные продукты деструкции «лигнина», однако их доля в суммарном количестве редуцирующих веществ гидролизатов ничтожно мала. Поэтому углеводсодержащие материалы, в том числе сфагновый торф, принято оценивать по суммарному выходу редуцирующих веществ, образующихся при кислотном гидролизе легко- и трудногидролизуемых полисахаридов их органической массы.

Исследования гидролизатов сфагновых мхов – продуктов их химической деструкции, показали, что значительная часть их органической массы представлена редуцирующими веществами, в том числе моносахаридами. Их доля в легкогидролизуемых углеводах для ангустифолиум-мха составила 55,7 %, фускум-мха – 56,2, магелланикум-мха – 59,1, апикулятум-мха – 59,2 %. В гемицеллюлозах сфагновых торфов доля редуцирующих веществ несколько ниже – 53,4–54,1 %.

Трудногидролизуемые полисахариды в сфагновых мхах на 94–99 % представлены редуцирующими веществами, а в торфах – на 92,5–97,2 %.

Если оценить суммарный выход водорастворимых, легко- и трудногидролизуемых веществ, то у мхов грядовой группы он составил 85,3–85,4 % от их органической массы, а у влаголюбивого апикулятум-мха достиг 87,6 % за счет повышенного содержания наиболее лабильных компонентов – гемицеллюлоз (легко гидролизуемые вещества) и водорастворимых веществ.

В торфах суммарный уровень гидролизуемых веществ также был очень высок, но значительно ниже, чем в растениях-торфообразователях, и не превышал 72,4–72,9 %.

Выход гуминовых кислот составил для магелланикум-торфа – 18,2–20,9 %, для фускум-торфа – 17,7–19,5 % от органической массы. Получается, что выбранные виды торфа отличались невысоким содержанием гуминовых веществ, что обусловлено низкой степенью разложения. При этом гуминовыми кислотами в магелланикум-торфе представлено 64,8 и 66,0 %, в фускум-торфе – 65,6 и 68,9 %, а фульвокислотами – 35,2; 34,0 % и 34,4; 31,1 % гуминовых веществ соответственно.

Все исследуемые образцы мхов отличались достаточно высоким содержанием так называемого лигнина – негидролизуемого остатка, массовая доля которого в органическом веществе составила 11–13 %. В торфах негидролизуемый остаток представлен 7,1 и 8,0 %.

Заключение. Выбранные для исследований образцы – растения-торфообразователи верховых сфагновых болот и малоразложившийся сфагновый торф ($R = 10$ %), характеризуются низкой зольностью (1,32–3,59 %), высоким содержанием органических веществ, а их активная кислотность лежит

в пределах 3,8–4,4 единицы, что характерно для верхового торфа сфагнового типа и растений-торфообразователей этого торфа.

Образцы сфагновых мхов и сфагнового торфа, отобранные для работы, являются лабильным гемицеллюлозосодержащим сырьем. Количество легкогидролизуемых полисахаридов в мхах достигало 55 %, в торфах – 43–45 % от органического вещества. Их гидролиз разбавленными растворами минеральных кислот привел к глубокой деструкции гемицеллюлоз. Гидролизаты гемицеллюлоз мхов при этом содержали до 55–59 %, торфа – 53–54 % редуцирующих веществ. Содержание целлюлозы в органической массе сфагновых мхов составляло 23–26 %, торфа – 22–24 %. Массовая доля гуминовых веществ в составе органической части торфов была невелика и составляла 17,7–20,9 %. Во всех образцах присутствовали экстрактивные вещества, извлекаемые органическими растворителями и включающие жирные кислоты, жирные спирты, сложные эфиры, углеводороды и смолистые вещества. Их содержание в торфах составило 1,8–2,3 %, в мхах – 0,8–1,8 %. Массовая доля негидролизуемого остатка («лигнина») в торфах – 7,1–8,0 %, в мхах – 11–13 %.

По результатам анализа научной литературы, выполненной спектральной и химической характеристик выбранных образцов можно сделать заключение, что среди биологически активных веществ, обнаруженных в их составе, наибольший интерес представляют полисахаридный и фенольный комплексы, поскольку биоцидные свойства сфагновых мхов и торфа малой степени разложения можно связать с наличием этих соединений.

Таким образом, сфагновые мхи и сфагновые торфа могут рассматриваться как перспективное природное сырье для разработки новых антибактериальных, противовирусных, фунгицидных средств для медицины, ветеринарии, растениеводства. Препараты, полученные на их основе, обладают высокой биологической активностью, низкой токсичностью при минимуме побочных эффектов.

Список использованных источников

1. Подтероб, А. П. История применения растений рода *Sphagnum* в медицине / А. П. Подтероб, Е. В. Зубец // Химико-фармацевтический журнал. – 2002. – № 36 (4). – С. 7–29.
2. Бабешина, Л. И. История и перспективы использования сфагновых мхов в медицине / Л. И. Бабешина, Н. И. Капус. – Томск : Наука, 2016. – 189 с.
3. Дмитрук, В. Н. Фармакологическое исследование растений рода *Sphagnum* / В. Н. Дмитрук, М. В. Белоусов, Л. Г. Бабешина. – Германия : Изд-во Lambert, 2011. – 261 с.
4. Федько, И. В. Химико-фармакологическое исследование специфических органических веществ торфа : дис. ... канд. фарм. наук / И. В. Федько. – 2006. – 128 с.
5. Биологически активные соединения различных видов сфагнового торфа / Г. В. Наумова [и др.] // Химия твердого топлива. – 2015. – № 3. – С. 8–13.
6. Фенольные соединения сфагнового торфа / Г. В. Наумова [и др.] // Химия твердого топлива. – 2013. – № 1. – С. 24–27.
7. Исследование полисахаридов некоторых видов рода *Sphagnum* L. / Л. Г. Бабешина [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. – Химия. – 2011. – № 3. – С. 413–422.
8. Корсун, В. Ф. Об использовании торфа в онкологической практике / В. Ф. Корсун, Е. В. Корсун, В. М. Козин // Сопроводительная фитотерапия. – М., 2015. – С. 58–67.
9. Белоусов, М. В. Фармакологическая активность этанольного экстракта из сфагнума бурого (*Sphagnum fuscum* (Shimp) Klinggr) / М. В. Белоусов [и др.] // Химия растительного сырья. – 2008. – № 3. – С. 129–134.
10. Средство антибактериальное на основе экстракта мха сфагнума : пат. RU 2 706 218 / А. А. Пименова, И. В. Ананьина, Н. В. Самохвалова, Д. Ю. Отшамов, В. В. Леонов. – Оpubл. 15.11.2019.
11. Средство, обладающее противовоспалительным и болеутоляющим действием, способ его получения : пат. RU 2 396 973 / С. Е. Дмитрук, Л. Г. Бабешина, В. Н. Дмитрук. – Оpubл. 20.08.2010.
12. ГОСТ 11305-2013. Торф и продукты его переработки. Методы определения влаги. – М. : Стандартинформ, 2013. – 7 с.
13. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск, 1975. – С. 183–194.

References

1. Podterob A. P. *Istoriya primeneniya rastenij roda Sphagnum v medicine* [History of application of plants of genus *Sphagnum* in medicine]. *Himiko-farmaceuticheskij zhurnal = Chemico-Pharmaceutical J.*, 2002, no. 36 (4), pp. 7–29. (in Russian)
2. Babeshina L. I., Kapus N. I. *Istoriya i perspektivy ispol'zovaniya sfagnovykh mхов v medicine* [History and prospects for the use of sphagnum mosses in medicine]. Tomsk, Science Publ., 2016, 189 p. (in Russian)

3. Dmitruk V. N., Belousov M. V., Babeshina L. G. *Farmakologicheskoe issledovanie rastenij roda Sphagnum* [Pharmacological study of plants of the genus *Sphagnum*]. Germany, Lambert Publ., 2011, 261 p. (in Russian)
4. Fed'ko I. V. *Himiko-farmakologicheskoe issledovanie specificheskikh organicheskikh veshchestv torfa. Diss. cand. farmatsevt. nauk* [Chemico-pharmacological study of specific organic substances of peat. Cand. pharm. sci. diss.]. 2006, 128 p. (in Russian)
5. Naumova G. V., Thomson A. E., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F. *Biologicheski aktivnye soedineniya razlichnykh vidov sfagnovogo torfa* [Biologically active compounds of various kinds of sphagnum peat]. *Himiya tverdogo topliva = Chemistry of Solid Fuels*, 2015, no. 3, pp. 8–13. (in Russian)
6. Naumova G. V., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F. *Fenol'nye soedineniya sfagnovogo torfa* [Phenolic compounds of sphagnum peat]. *Himiya tverdogo topliva = Chemistry of Solid Fuels*, 2013, no. 1, pp. 24–27. (in Russian)
7. Babeshina L. G., Gorina Y. V., Kolokolova A. P., Krasnov E. A., Karpova M. R. *Issledovanie polisaharidov nekotorykh vidov roda Sphagnum L.* [Study of polysaccharides of some species of the genus *Sphagnum* L.]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Himiya = J. of Siberian Federal University. Chemistry*, 2011, no. 3, pp. 413–422. (in Russian)
8. Korsun V. F., Korsun E. V., Kozin V. M. *Ob ispol'zovanii torfa v onkologicheskoy praktike* [On the use of peat in oncological practice]. *Soprovoditel'naya fitoterapiya = Companion phytotherapy*. Moscow, 2015, pp. 58–67. (in Russian)
9. Belousov M. V., Akhmedjanov P. P., Yusubov M. S., Dmitruk V. N., Babeshina L. G., Dmitruk S. E. *Farmakologicheskaya aktivnost' etanol'nogo ekstrakta iz sfagnuma burogo (Sphagnum fuscum (Shimp) Klinggr)* [Pharmacological activity of ethanol extract of brown sphagnum (*Sphagnum fuscum* (Shimp) Klinggr)]. *Himiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of vegetable raw materials*, 2008, no. 3, pp. 129–134. (in Russian)
10. Pimenova A. A., Anan'ina I. V., Samohvalova N. V., Otshamov D. Yu., Leonov V. V. *Sredstvo antibakterial'noe na osnove ekstrakta mha sfagnuma* [Antibacterial remedy based on an extract of sphagnum moss]. Patent RF, no. 2 706 218, 2017. (in Russian)
11. Dmitruk S. E., Babeshina L. G., Dmitruk V. N. *Sredstvo, obladayushchee protivovospalitel'nykh i boleutolyayushchimi dejstviyami, sposob ego polucheniya* [Means having anti-inflammatory and analgesic effect, the method of its production]. Patent RF, no. 2 396 973, 2008. (in Russian)
12. GOST 11305–2013. *Torf i produkty ego pererabotki. Metody opredeleniya vlagi* [State Standard 11305–2013 Peat and products of its processing. Methods of moisture determination]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 7 p. (in Russian)
13. Lishtvan I. I., Korol' N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ih opredeleniya* [Basic properties of peat and methods of their determination]. Minsk, 1975, pp. 183–194. (in Russian)

Информация об авторах

Наумова Галина Васильевна – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Жмакова Надежда Анатольевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: zhmakova@mail.ru

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

Овчинникова Татьяна Феликсовна – 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 the authors

Galina V. Naumova – 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

Nadezhda A. Zhmakova – 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: zhmakova@mail.ru

Natalya L. Makarova – 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

Tatiana F. Ovchinnikova – 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

Макеевко Александр Александрович – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, г. Минск, Беларусь). E-mail: makeenko1507@mail.ru

Навоша Юльян Юльянович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: navoscha@tut.by

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

Aleksandr A. Makeyenko – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: makeenko1507@mail.ru

Yulian Yu. Navosha – Ph. D. (Physical and Mathematical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: navoscha@tut.by

Lyudmila P. Kalilets – 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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-136-145>
УДК 553.97:553.973

Поступила в редакцию 21.03.2022
Received 21.03.2022

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОРФА И САПРОПЕЛЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГУМИНОВОГО РЕГУЛЯТОРА РОСТА РАСТЕНИЙ

Б. В. Курзо, И. В. Кляуззе, М. В. Ворона,
С. М. Серая, О. М. Гайдукевич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Экспериментально обоснован подбор торфяного и сапропелевого сырья для получения гуминового регулятора роста растений с повышенной биологической активностью. Использование торфа и сапропеля в качестве сырьевых компонентов для гидролиза и получения биологически активных препаратов позволяет перевести в раствор значительное количество микроэлементов. В Лельчицком районе Гомельской области выявлены и охарактеризованы сырьевые базы торфа и сапропеля, пригодные для получения биологически активных препаратов. Обоснован выбор первоочередного участка Прибыловичи с залежами низинного осокового и осоково-тростникового торфа и кремнеземистого сапропеля. Карбонатный сапропель не пригоден для получения гуминовых препаратов вследствие низкого выхода гуминовых кислот, область его применения – использование в составе кормовых добавок или в качестве раскислителя почв. Нарботана опытная партия гуминового препарата с установленными оптимальными параметрами, которая с положительным эффектом испытана в полевых условиях на деляночных опытах с ячменем озимым и тритикале. Предпочтительным вариантом использования жидкого гуминового препарата, выделенного из смеси торфа и сапропеля, является предварительная замочка семян с оптимальной концентрацией препарата для этой цели – 0,07–0,10 %. Для полива под корень концентрация препарата составляет 0,004–0,006 %. Разработан гуминовый препарат «Тосагум», который прошел необходимые двухлетние испытания на различных сельскохозяйственных культурах в специализированных центрах Национальной академии наук Беларуси.

Ключевые слова: торф; сапропель; запасы; качественные характеристики; гуминовые препараты; эффективность применения; перспективные месторождения.

Для цитирования. Курзо Б. В., Кляуззе И. В., Ворона М. В., Серая С. М., Гайдукевич О. М. Использование торфа и сапропеля для получения гуминового регулятора роста растений // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 136–145.

USE OF PEAT AND SAPROPEL FOR OBTAINING HUMIC PLANT GROWTH REGULATOR

B. V. Kurzo, I. V. Klyauzze, M. V. Vorona,
S. M. Seraya, O. M. Gaidukevich

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

Abstract. The selection of peat and sapropel raw materials for obtaining a humic plant growth regulator with increased biological activity is experimentally substantiated. The use of peat and sapropel as raw materials for hydrolysis and the production of biologically active preparations makes it possible to transfer a significant amount of microelements into solution. In Lelchitsky district of Gomel region, the raw material bases of peat and sapropel, suitable for obtaining biologically active preparations, have been identified and characterized. The choice of the priority site Pribylovichi with deposits of low-lying sedge and sedge-reed peat and siliceous sapropel is substantiated. Carbonate sapropel is not suitable for obtaining humic preparations due to the low yield of humic acids; its scope is the use as a part of feed additives or as a soil deoxidizer. An experimental batch of a humic preparation with established optimal parameters has been produced, which has been tested with a positive effect in the field on plot experiments with winter barley and triticale. The preferred option for using a liquid humic preparation isolated from a mixture of peat and sapropel is the pre-clotting of seeds with the optimal concentration of the preparation for this purpose – 0.07–0.10 %. For irrigation under the root the concentration of the drug is 0.004–0.006 %. The humic preparation "Tosagum" was developed, which passed the necessary two-year tests on various crops in specialized centers of the National Academy of Sciences of Belarus.

Keywords: peat; sapropel; reserves; quality characteristics; humic preparations; application efficiency; promising deposits.

For citation. Kurzo B. V., Klyauzze I. V., Vorona M. V., Seraya S. M., Gaidukevich O. M. Use of peat and sapropel for obtaining humic plant growth regulator. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 136–145.

Введение. Эффективное освоение торфяных и сапропелевых ресурсов предполагает их комплексное использование с созданием технологий, позволяющих наиболее полно реализовывать потенциальные возможности сырья. Образование торфа и сапропеля – сложный биохимический процесс распада растительных остатков в условиях избыточного увлажнения и ограниченного доступа воздуха. В образовании торфа участвуют остатки мхов, кустарников, травянистых и древесных растений, развитие которых определяется преимущественно условиями питания – атмосферного или грунтового. В зависимости от фитоценозов в торфогенном слое формируются торфа разнообразного состава, накапливаются и концентрируются соединения, как свойственные растениям, так и синтезированные в процессе образования торфа. Образование органического вещества сапропеля происходит в результате отмирания и разложения в бескислородной среде водорослей, макрофитов и водных животных. В зависимости от главного источника органического вещества выделяются торфянистый, высоко-, средне- и низкогумусный классы органического сапропеля [1].

Наличие в торфе и сапропеле широкой гаммы химических соединений дает возможность рассматривать их как ценное химическое сырье для самых разных отраслей промышленности. Модифицирование еще более расширяет спектр продуктов, получаемых на основе этих видов сырья. Сложность и разнообразие химического состава различных видов торфа и сапропеля требует тщательного подбора сырья при производстве того или иного вида продукции на его основе [2]. Торф как энергетическое топливо не является однородным материалом и в зависимости от вида топлива имеет теплоту сгорания 11 000–17 000 кДж/кг. Как сырье для последующей переработки он существенно различается по химическому составу в пределах типов, групп и видов. Комплексная переработка торфа по безотходным технологиям с получением продуктов и материалов различного назначения позволяет, по сравнению с энергетическим применением, многократно повысить эффективность его использования. При этом необходимо учитывать, что торф является геологическим образованием, в котором органическое вещество прошло только начальную стадию превращения, и в процессе добычи и хранения изменяются его химический состав и свойства [3].

На основе гуминового комплекса торфа получены биостимуляторы и ростовые вещества, удобриельные смеси и мелиоранты, торфяные красители для древесины, химических волокон, тканей, кож, ингибиторы коррозии, лекарственные средства, поглотители вредных веществ из газовых и водных сред (в том числе радионуклидов), реагенты для буровой техники и производства строительных материалов.

Гуминовые вещества торфа и сапропеля оказывают благоприятное влияние на рост растений. Под влиянием низких концентраций гуминовых кислот (0,01–0,0001 %) в растениях активизируются все основные звенья обмена веществ: синтез белка, нуклеиновых кислот, фосфорсодержащих соединений – переносчиков энергии. Особенно заметно растения реагируют на воздействие гуматов в начале своего развития: повышаются энергия и скорость прорастания семян, активизируется корнеобразование у проростков, что обеспечивает ускоренное развитие растений и повышенную устойчивость к неблагоприятным условиям среды. Активизация обменных процессов и синтезирующих систем у растений в присутствии гуматов способствует повышению урожая и улучшению его качества.

Биологическая активность органического сапропеля превышает аналогичный показатель торфов, углей, горючих сланцев, лигнинов. Это объясняется тем, что гуминовые и фульвовые кислоты сапропеля отличаются высоким содержанием легко мобилизуемых гидролизуемых веществ, быстро вовлекаемых в круговорот углерода в системе почва – микроорганизмы – растения – почва. Это позволяет быстро и эффективно восполнять необходимый запас активного углерода и азота в структуре почвенных гумусовых молекул, ежегодно расходуемых в процессе жизнедеятельности микроорганизмов и возделываемых растений. Тем самым обеспечиваются поддержание и воспроизводство плодородия почв [4].

Высокая биологическая активность, оптимальные размеры и конфигурация макромолекул, а также состав и соотношения гуминовых и фульвовых кислот, выделенных из сапропеля, в полной мере использованы в удобрениях серии «Дарина» ЗАО «Балтконверсия» (Санкт-Петербург). Спектр действия этих гуминовых удобрений существенно шире, чем у других гуминовых препаратов и обеспечивает высокую эффективность применения на любых сельскохозяйственных культурах при самых различных погодных, почвенных и экологических условиях [5].

Эффективность применения гуматов усиливается при совместном использовании торфа и сапропеля, что объясняется синергетическим эффектом.

Цель работы – осуществить подбор сырья и оптимальных условий для выделения гуминовых веществ из торфа и сапропеля, пригодных для получения биологически активных препаратов.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования являются торфяные и сапропелевые месторождения Лельчицкого района Гомельской области.

Образцы торфа и сапропеля отобраны из залежи согласно сложившейся практике геологоразведочных работ по ГОСТ 5396-77 [6]. Определение содержания влажности, золы и обменной кислотности для всех образцов проведено по ГОСТ 11305-83 [7], ГОСТ 11306-83 [8] и ГОСТ 11623-89 соответственно [9]. Содержания оксидов Fe_2O_3 , CaO , SO_3 , P_2O_5 , K_2O и $\text{N}_{\text{общ}}$ установлены с учетом требований ГОСТ 10538-87 [10]. При определении ботанического состава торфа использован атлас расти-

тельных остатков, встречаемых в торфе [11], и ГОСТ 21123-85 [12]. Степень разложения торфа установлена глазомерно-процентным микроскопическим методом в соответствии с ГОСТ 10650-72 [13].

Для определения содержания гуминовых кислот использован метод Инсторфа [14]. Метод определения гуминовых кислот, полученных в результате щелочной экстракции торфо-сапропелевого сырья, заключается в осаждении гуминовых кислот из раствора путем его подкисления серной кислотой до pH 1,0–2,0 с последующим вымораживанием осадка, отмывкой его от кислоты, высушиванием и взвешиванием. В емкость вносится 10 мл препарата и 40 мл воды. В препарат приливается раствор H₂SO₄ массовой долей 10 % до pH 1,0–2,0. Значение pH контролируется индикаторной универсальной бумагой. Содержимое помещается в холодильную камеру на 24 ч при температуре не выше 6 °С до полного выпадения гуминовых кислот. После извлечения емкости из холодильной камеры происходит полное размораживание содержимого и его отфильтровывание. Осадок гуминовых кислот на фильтре промывается дистиллированной водой до нейтральной реакции. Фильтр с осадком высушивается до постоянной массы при температуре 80 °С. Массовая доля гуминовых кислот в препарате составляет:

$$C = \left[(m_1 - m) \cdot \frac{100}{m_0} \right],$$

где m_0 – масса препарата, взятого на анализ, г; m_1 – масса бюкса вместе с фильтром и осадком после высушивания, г; 100 – коэффициент пересчета; m – масса бюкса с фильтром, г.

Результаты исследований. В Лельчицком административном районе, на базе которого выполнены исследования, сосредоточено около 20 % запасов торфа Гомельской области, что характеризует район как хорошо обеспеченный торфяными ресурсами. По данным геологических фондов в районе разведано 48 торфяных месторождений (далее – т. м.) – 3 % от общего количества в Гомельской области. Площадь т. м. района в нулевых границах составляет 78,8 тыс. га, или 14 % от общей площади месторождений области. Общие запасы торфа условной влажностью 40 % по состоянию на 1 января 2022 г. составляют 166,5 млн т.

Количественно в Лельчицком районе преобладают средние (100–300 га) и крупные (300–1000 га) т. м. (табл. 1). Имеющиеся геологические запасы торфа распределяются по типам залежи следующим образом: низинный – 57 %, верховой – 19, переходный – 17, смешанный – 7 %. Пятая часть всех запасов торфа приходится на верховой тип, что не характерно для Гомельской области в целом, где преобладает низинный торф (86 % общего объема [15]), а верховой встречается редко и составляет 10 % запасов. В Лельчицком районе сосредоточена третья часть запасов верхового торфа (31,6 млн т) Гомельской области.

Таблица 1. Распределение торфяных месторождений Лельчицкого района по площади

Table 1. Distribution of peat deposits in the Lelchitsy region by area

Площадь в нулевых границах, га	Количество месторождений, ед.	Площадь в нулевых границах, га	Количество месторождений, ед.
1–10	1	301–1000	19
11–100	5	1001–10 000	7
101–300	13	Более 10 000	3
Всего			48

Многие т. м. Лельчицкого района образованы на месте бывших озер и подстилаются сапропелем. Такие наиболее перспективные для комплексного использования месторождения, как Топиловское, Урочище Берин, Милошевичи, южная часть торфомассива Кандель – Яловец – Ольхово (участок «Ударное»), ранее использовались только с целью получения торфа для компостирования. Сапропель также имеется на месторождениях Крупка (кадастровый номер 1257) в объеме 25 тыс. м³ и Даниловское (кадастровый номер 1259) – 600 тыс. м³ [16].

В результате сбора и анализа материалов Государственного геологического фонда по ресурсному потенциалу т. м. с сапропелем Лельчицкого района установлено, что на большинстве таких месторождений выполнены детальные геологоразведочные работы и они подготовлены для освоения. В пределах района перспективны подготовленные для разработки торфоучастки «На варте» и северо-западный т. м. Топиловское, участок «Ударное» т. м. Кандель – Яловец – Ольхово, участки «Волосиха» и «Верховина» т. м. Милошевичи, а также т. м. Урочище Берин, Забок, Крупка. На этих объектах, а также в осушенном оз. Прибыловичи общие запасы сапропеля составляют более 1 млн т (табл. 2). Данные объекты имеют перспективу для разработки торфа и сапропеля, так как:

– включают ранее разрабатывавшиеся участки с имеющейся для организации добычи инфраструктурой (участок «На варте», северо-западный участок т. м. Топиловское, т. м. Урочище Берин и Крупка);

– имеют в подстилании слои сапропеля, перспективные для добычи (участки «Волосиха», «Верховина» и «Ударное», т. м. Урочище Берин и Крупка);

– включают низинный торф высокой степени разложения с повышенным выходом гуминовых веществ (участок «Прибыловичи», северо-западный участок т. м. Топиловское) или обладают низкой зольностью при высокой степени разложения (т. м. Урочище Берин и Крупка).

– осушены сетью мелиоративных каналов, что позволяет снизить затраты на подготовку залежей к эксплуатации.

На ближайшую перспективу интересным объектом является т. м. Крупка в районе населенного пункта Буйновичи с залежами верхового торфа высокой степени разложения и низкой зольностью. ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси» для ООО «Органик Фармер Бел» в 2022 г. выполнило детальную разведку центральной части этого месторождения. Предприятие планирует использовать сырье месторождения для производства различной продукции, в том числе жидких гуминовых препаратов.

Таблица 2. Ресурсы торфа и сапропеля на перспективных для разработки объектах Лельчицкого района Гомельской области

Table 2. Resources of peat and sapropel in promising areas for development objects of the Lelchitsky district of the Gomel region

Объект	Площадь, га	Запасы, торф/сапропель, тыс. т	Тип торфа и сапропеля	Среднее значение, %		Современное состояние месторождения
				степени разложения	зольности	
Оз. Прибыловичи	120	70	Торф низинный	33	12–15	Месторождение разрабатывается
		570	Сапропель кремнеземистый	–	52,9	
			Сапропель смешанный	–	52,1	
			Сапропель карбонатный	–	57,4	
Т. м. Топиловское, участок «На варте»	80	240	Торф низинный и смешанный	27	9,5	Участок разрабатывается
Т. м. Топиловское, северо-западный участок	135	400	Торф низинный и переходный	33	5–7	Разведано, стадия оформления горного отвода
Т. м. Милошевичи, участки «Верховина» и «Волосиха»	175	1340	Торф низинный	35	11–12	Разведано, стадия оформления горного отвода
		420	Сапропель кремнеземистый	–	25–45	
Т. м. Кандель – Яловец – Ольхово, участок «Ударное»	210	600	Торф низинный	30	10–12	Разведано, стадия оформления горного отвода
		60	Сапропель кремнеземистый	–	30–55	Требуется доразведка
Т. м. Урочище Берин	100	280	Торф верховой	38–40	3–4	Стадия доразведки
		30	Сапропель органический	–	20–30	
Т. м. Забок	400	1370	Торф верховой и переходный	20–22	4–5	Первоочередное на перспективу
Т. м. Крупка	70	100	Торф верховой	40–41	4–5	Стадия утверждения запасов
		20	Сапропель кремнеземистый	–	40–60	
Всего	1300	4400/1100	–	–	–	–

Важным критерием для научно обоснованного выбора первоочередных участков разработки торфяного и сапропелевого сырья является качество (пониженная зольность и высокая степень разложения), а также объемы запасов торфа и сапропеля. Выявлено восемь первоочередных для разработки т. м. и торфоучастков с общими запасами торфа около 4,4 млн т для производства компостированного торфа, торфяных пеллет и биологически активных гуминовых торфо-сапропелевых препаратов.

Выполненные исследования позволяют дать развернутую характеристику разведанным запасам торфа и сапропеля Лельчицкого района и обосновать перспективность производства биологически активных жидких гуминовых препаратов (гуматов).

Наиболее распространенные способы выделения гуминовых кислот основаны на их способности образовывать водорастворимые соли с одновалентными катионами натрия, калия и аммония. Водные растворы гидроксидов этих элементов и служат средой для извлечения гуминовых веществ и продуктов их модифицирования из гумифицированного сырья. При получении торфяных гуминовых препаратов различного целевого назначения, как правило, производят то или иное модифицирование гуминового комплекса торфа для увеличения выхода и усиления полезных свойств препарата.

Известно, что использование сапропеля в качестве удобрения в сельском хозяйстве зачастую может быть эффективнее, чем торфа, в связи с более высоким содержанием в их составе азота, фосфора, аминокислот и микроэлементов [17]. Ранее исследована возможность применения органического сапропеля оз. Судобль в качестве сырья для получения регулятора роста растений методом кислотного-щелочного гидролиза [18]. Выделенный препарат показал более высокую биологическую активность, чем полученный из торфа. Для получения гуминового препарата многоцелевого назначения использован сапропель кремнеземистого типа, отобранный на т. м. Прибыловичи.

Исследования возможности получения торфяных гуминовых препаратов показывают, что в связи с разнообразием видов торфа и сапропеля, а следовательно, их химического состава, требуется научно обоснованный подбор сырья для получения препаратов нужного качества. Использование сапропеля и торфа в качестве сырья для гидролиза и получения биологически активных препаратов позволяет перевести в раствор значительное количество микроэлементов, накопление которых в сапропеле увеличено в разы по сравнению с торфом. Как показывают эксперименты с торфо-сапропелевым сырьем (соотношение торф : сапропель – 1 : 1) т. м. Топиловское и оз. Прибыловичи, в сухом остатке полученных гуматах калия и гуминовых кислотах торфа и сапропеля, а также в гуминовых кислотах сапропеля повышена концентрация кобальта, меди, селена, молибдена, по сравнению с аналогичными продуктами из торфа, что объясняется невысоким содержанием многих микроэлементов в исходном торфе (табл. 3).

Таблица 3. Содержание микроэлементов в исходном сырье, гумате калия из их смеси и гуминовых кислотах, мг/кг сухого вещества

Table 3. The content of trace elements in the feedstock, potassium humate from their mixture and humic acids, mg/kg dry matter

Элемент	Исходное сырье		Продукты переработки		
	Торф (т. м. Топиловское)	Сапропель (оз. Прибыловичи)	Гуминовые кислоты		Гумат калия, торф : сапропель – 1 : 1 (сухой продукт)
			торфа (т. м. Топиловское)	сапропеля (оз. Прибыловичи)	
Марганец	24,0	49,0	6,7	23,3	49,0
Кобальт	2,7	17,3	2,0	22,7	5,3
Никель	8,4	30,7	7,0	44,8	14,3
Медь	4,0	8,8	2,8	12,9	7,1
Цинк	11,3	107,0	15,4	23,9	17,2
Селен	0,9	1,3	0,8	2,9	1,5
Молибден	0,2	0,8	0,6	2,9	1,0
Фосфор	1210	4850	939	1400	1820

Поскольку на рынке растворимые и твердые гуматы натрия, аммония и калия пользуются устойчивым спросом, проведена серия экспериментов с торфом и сапропелем месторождений Лельчицкого района по выделению и характеристике гуматов, полученных щелочной экстракцией, а также их смесей для подбора наиболее эффективного сырья. Для этого получены:

– гумат натрия щелочной экстракцией торфа т. м. Топиловское. Для экстракции взят образец с влажностью 13,0 % и зольностью 5,5 %. Торф обработан 2%-м раствором NaOH (гидро модуль обработки 1 : 10) при температуре кипения в течение 1 ч. В результате концентрация гуминовых кислот в полученном препарате составляет 4,3 %;

– гумат натрия щелочной экстракцией кремнеземистого сапропеля оз. Прибыловичи. Для экстракции взят образец с влажностью 12,9 % и зольностью 57,3 %. Сапропель обработан 2%-м раствором едкого натра (гидро модуль обработки 1 : 10) при температуре кипения в течение 1 ч. Концентрация гуминовых кислот составляет 1,6 %;

– гумат калия из смеси торфа т. м. Топиловское и кремнеземистого сапропеля оз. Прибыловичи при соотношении торф : сапропель – 50 : 50. Торфо-сапропелевая смесь с гидро модулем 1 : 10 обра-

ботана 1%-м раствором едкого калия в течение 1 ч при температуре кипения. Концентрация гуминовых кислот в полученном препарате составляет 3,7 %. Остаток, образовавшийся после центрифугирования гидролизуемой смеси, имеет влажность 81,5 % и пригоден для получения углерод-минеральных адсорбентов или, после нейтрализации щелочи фосфорной кислотой, в качестве основы при приготовлении гранулированных органо-минеральных удобрений;

– гумат калия из смеси низинного торфа участка Прибыловичи т. м. Милошевичи и кремнеземистого сапропеля оз. Прибыловичи в соотношении торф : сапропель – 70 : 30. Гуматы выделены 1%-м раствором КОН при гидромодуле 1 : 10 кипячением раствора в течение 1 ч. Концентрация гуминовых кислот составляет 4,2 %;

– гумат калия из смеси торфа и сапропеля 40 : 60 щелочной экстракцией при гидромодуле 1 : 8. Эксперименты с едким калием и едким натром взяты в количестве 10 % на сухое вещество смеси. В результате опытов концентрация гуминовых кислот составляет 5,4 и 5,8 % соответственно. Несмотря на более высокую концентрацию растворов гуматов при использовании гидромодуля 1 : 8, от данного режима выделения пришлось отказаться, так как кипение смеси проходит неравномерно (толчками) и выбросами из-за высокой концентрации сухого вещества, а полученная смесь гуматов и остатка имеет высокую вязкость. Также в лабораторных условиях выгрузка остатка из реакционного сосуда затруднительна. Можно предположить, что при проведении процесса в промышленном автоклаве могут возникнуть сложности на стадии освобождения реактора от твердого остатка. Далее все последующие эксперименты проведены при гидромодуле 1 : 9, который, как показывают результаты, позволяет не только повысить концентрацию гуматов в растворе, но и получить реакционную смесь с вязкостью, приемлемой для освобождения реактора от твердого остатка;

– гумат натрия из карбонатного сапропеля оз. Прибыловичи с пониженным содержанием органического вещества (около 40 %). Для экстракции использована смесь торфа и сапропеля в соотношении 50 : 50. Концентрация гуминовых кислот в полученном препарате составляет 2,8 %;

– гумат калия с использованием в качестве щелочной добавки карбоната калия. Для экстракции взята смесь из 60%-го низинного торфа т. м. Милошевичи и 40%-го кремнеземистого малоугольного сапропеля оз. Прибыловичи, к которой добавлен щелочной реагент в количестве по элементу «калий», эквивалентном 13 % КОН. Обработка проведена в течение 6 ч. Концентрация гуминовых кислот составляет 4,6 %, что примерно соответствует их концентрации в препарате, полученном при обработке исходного сырья щелочью (4,8 %).

Выполненные исследования показывают возможность получения гуминовых препаратов на основе торфов т. м. Милошевичи и Топиловское и кремнеземистого сапропеля оз. Прибыловичи. Карбонатный сапропель не пригоден для получения гуминовых препаратов вследствие низкого выхода гуминовых кислот, область его применения – использование в составе кормовых добавок или в качестве раскислителя почв. Для щелочной экстракции гуматов калия и натрия выбраны следующие параметры: гидромодуль 1 : 9, состав смеси – 60 % низинного торфа т. м. Милошевичи и 40 % кремнеземистого сапропеля оз. Прибыловичи.

На основании выполненных исследований наработана опытная партия гуминового препарата с установленными оптимальными параметрами, которая с положительным эффектом испытана в полевых условиях на деляночных опытах с ячменем озимым и тритикале при поливе под корень при концентрации гумата 0,004–0,006 %. Возрастание зеленой массы ячменя больше проявляется при сравнении сырой массы. Это объясняется более высокой влажностью органов ячменя, особенно надземной части растения (рис. 1 и 2).

Эксперименты показывают, что оптимальная концентрация гуминового препарата для замочки семян озимого ячменя составляет 0,05–0,20 % с небольшим максимумом при 0,07 %. Препарат также испытан при замочке семян озимой тритикале в течение года (апреле и ноябре) (рис. 3).

Итоги деляночных экспериментов выявили высокую ростстимулирующую активность гуматов из смешанного торфо-сапропелевого сырья, выделенных при температуре кипения (97–98 °С) без давления. Причем положительным является то, что прирост массы превышает прирост высоты тестовых растений. Они становятся более мощными с развитой корневой системой (масса 10 мм растения для варианта с замочкой приблизительно на 17 % выше контроля).

Таким образом, предпочтительным вариантом использования жидкого гуминового препарата, выделенного из смеси торфа и сапропеля, является предварительная замочка семян с оптимальной концентрацией препарата для этой цели – 0,07–0,10 %. Для полива под корень концентрация препарата составляет 0,004–0,006 %.

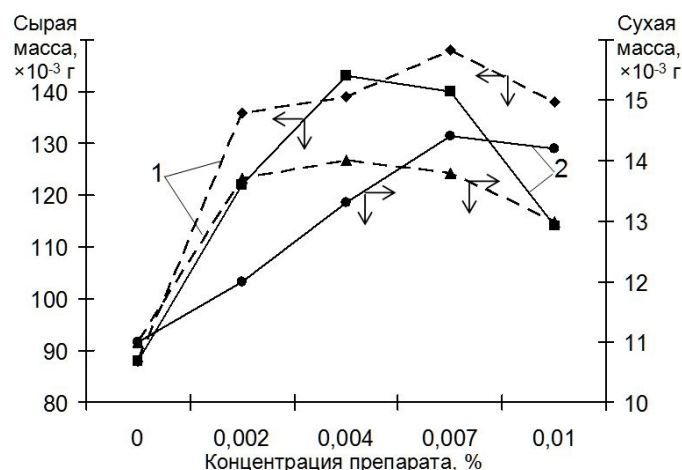


Рис. 1. Сырая и сухая массы стебля ячменя в полевых опытах при различном использовании препарата: 1 – замочка семян; 2 – полив под корень

Fig. 1. Raw and dry masses of barley stalk in field experiments with different use of the preparation: 1 – seed lock; 2 – watering under the root

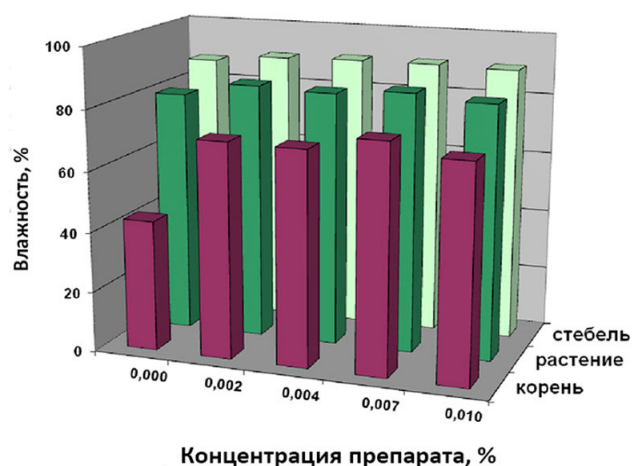


Рис. 2. Влажность проростков ячменя в зависимости от концентрации препарата при поливе под корень

Fig. 2. Humidity of barley seedlings depending on the concentration of the drug when watering under the root

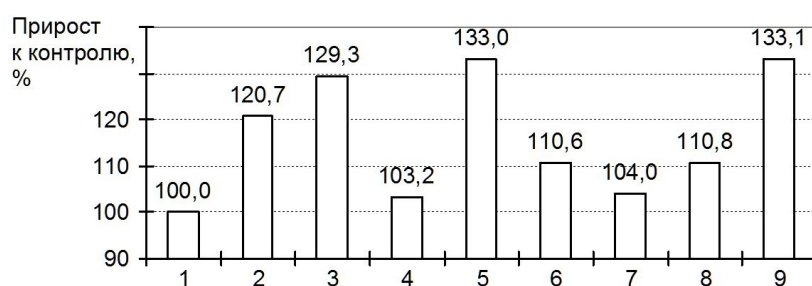


Рис. 3. Результаты деляночного эксперимента с озимой тритикале после предварительной замочки семян в препарате в апреле (2–6) и ноябре (7–9): 1 – контроль; 2 – высота растения; 3 – количество стеблей в растении (кустистость – 2,43/1,88); 4 – масса 1 стебля; 5 – масса 1 растения; 6 – масса 10 мм длины стебля (по сырой массе); 7 – высота растения; 8 – сырая масса 1 стебля; 9 – сухая масса 1 стебля

Fig. 3. Results of a plot experiment with winter triticale after preliminary soaking of seeds in the preparation in April (2–6) and November (7–9): 1 – control; 2 – plant height; 3 – the number of stems in the plant (bushiness – 2.43/1.88); 4 – weight of 1 stem; 5 – weight of 1 plant; 6 – weight of 10 mm stem length (by fresh weight); 7 – plant height; 8 – wet weight of 1 stem; 9 – dry weight of 1 stem

На основе торфо-сапропелевого сырья ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси» разработан гуминовый препарат «Тосагум», который прошел необходимые двухлетние испытания на различных сельскохозяйственных культурах в специализированных центрах Национальной академии наук Беларуси. Среднее увеличение урожайности при выращивании овощной продукции по сравнению с контролем составляет: на картофеле – 8,4 %, капусте – 10,0, томате – 11,0, огурце – 13,0, сладком перце – 17,0, свекле – 18,0, моркови – 24,0 %. Применение препарата в дозе 1,0–2,0 л/га под овощные культуры целесообразно производить 3 раза: на 10–12-й день после высадки рассады, на начало образования корнеплода или кочана и за 3 недели до уборки урожая.

Полевые испытания препарата в течение 2 лет показывают, что однократное применение препарата «Тосагум» в качестве некорневой подкормки по вегетирующим растениям (в фазу выхода в трубку) ячменя на фоне $N_{100}P_{50}K_{120}$ на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве обеспечивает увеличение урожайности зерна ячменя в среднем на 9,7 % при дозах внесения препарата 2,0–3,0 л/га и урожайности зерна базового варианта 60,0 ц/га. Увеличение урожайности яровой пшеницы в тех же условиях составляет 7,6–8,2 % при урожайности зерна базового варианта 49,0 ц/га, кукурузы – на 8,8 % при урожайности базового варианта кукурузы на зерно 148,2 ц/га. Урожайность картофеля увеличивается на 10,6 % при урожайности базового варианта 311,0 ц/га.

По параметрам острой токсичности регулятор роста растений «Тосагум» относится к малоопасным веществам, не раздражает кожные покровы, обладает слабым irritативным действием, не обладает сенсibilизирующим действием. Действующее вещество препарата имеет природное происхождение, в связи с чем нецелесообразно проводить контроль над уровнем остаточных количеств препарата в растениеводческой продукции, а также содержанием их в почве, водоемах и атмосферном воздухе.

Препарат гуминовый «Тосагум» включен в список препаратов, разрешенных к применению субъектами хозяйствования и для использования в розничной продаже населению, что подтверждается Удостоверением Главной государственной инспекции по семеноводству, карантину и защите растений Минсельхозпрода Республики Беларусь № 2526 от 17.12.2014. В настоящее время технология производства препарата передана на три предприятия для организации выпуска. На двух предприятиях начат выпуск опытных партий.

Заключение. Таким образом, выявлены наиболее перспективные и подготовленные для разработки торфа и сапропеля месторождения и торфяные участки Лельчицкого района, среди которых северо-западный участок т. м. Топиловское. В результате проведенных химических и ботанических исследований дана развернутая характеристика разведанным запасам торфа и сапропеля на изученных участках, а также выбран первоочередной участок для производства биологически активных жидких гуминовых препаратов (гуматов) из торфо-сапропелевого сырья Лельчицкого района – участок «Прибыловичи» с низинным торфом осокового и осоково-тростникового вида и залежь кремнеземистого сапропеля в расположенном рядом с ним оз. Прибыловичи.

Показана возможность получения гуминовых препаратов на основе торфов месторождений Милошевичи и Топиловское, а также кремнеземистого сапропеля оз. Прибыловичи. Карбонатный сапропель не пригоден для получения гуминовых препаратов вследствие низкого выхода гуминовых кислот, область его применения – использование в составе кормовых добавок или в качестве раскислителя почв. В ходе проведенных экспериментов по щелочной экстракции и характеристики гуматов калия и натрия обоснованы следующие параметры процесса: гидромодуль 1 : 9, состав смеси – 60 % низинного торфа т. м. Милошевичи и 40 % кремнеземистого сапропеля оз. Прибыловичи. Использование сапропеля в качестве сырьевого компонента для гидролиза и получения биологически активных препаратов позволяет перевести в раствор значительное количество микроэлементов, накопление которых в сапропеле значительно увеличено по сравнению с торфом.

Испытания гуминового препарата на культурах ячменя озимого и тритикале выявили, что оптимальной концентрацией препарата для предварительной замочки семян является концентрация 0,07–0,10 %. При поливе под корень вегетирующего растения оптимальная концентрация препарата составляет 0,004–0,008 %. Активизация обменных процессов и синтезирующих систем у растений в присутствии гуматов способствует повышению урожая и улучшению его качества. Под влиянием низких концентраций гуминовых кислот из торфа и сапропеля растения особенно заметно реагируют на воздействие гуматов в начальной стадии своего развития: повышаются энергия и скорость прорастания семян, активизируется образование корней у проростков, что обеспечивает ускоренное развитие растений и повышенную устойчивость к неблагоприятным условиям среды. В результате деляночных опытов, выполненных в весеннее и осеннее время, установлено, что предварительная замочка семян озимой тритикале увеличивает высоту стебля растений от 4,0 до 20,7 % по сравнению с контролем, кустистость растения возрастает приблизительно на 30 %, масса одного растения увеличивается на 40,2 %. Положительным моментом является то обстоятельство, что прирост массы превышает прирост высоты тестовых растений.

Они становятся более мощными, с развитой корневой системой, так как сухая масса 1 см растения для варианта с замочкой приблизительно на 17 % выше контроля.

Разработан гуминовый препарат «Тосагум» на основе торфо-сапропелевого сырья, который с положительным результатом прошел необходимые двухлетние испытания в специализированных центрах Национальной академии наук Беларуси на различных сельскохозяйственных культурах. Главной государственной инспекцией по семеноводству, карантину и защите растений Минсельхозпрода Республики Беларусь препарат гуминовый «Тосагум» включен в список препаратов, разрешенных к применению субъектами хозяйствования и для использования в розничной продаже населению. Технология производства препарата передана на три предприятия для организации его выпуска.

Список использованных источников

1. СТБ 17.04.02–01–2010. Охрана окружающей среды и природопользование. Недра. Сапропель. Промышленно-генетическая классификация. – Минск : Госстандарт, 2011.
2. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова. – Минск : Беларуская навука, 2009. – 328 с.
3. Гаврильчик, А. П. Трансформация свойств торфа при антропогенном воздействии / А. П. Гаврильчик, Т. Я. Кашинская. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 305 с.
4. Пастух, О. Н. Эффективность органо-минеральных гуминовых удобрений Добрин / О. Н. Пастух // Сапропель и продукты его переработки. – Омск, 2008. – С. 22–23.
5. Комаров, А. А. Физиологическое действие на растения гуматов, входящих в состав комплексных агро-адаптогенов / А. А. Комаров // Биологически активные препараты для растениеводства. – Минск, 2018. – С. 98–100.
6. ГОСТ 5396-77. Торф. Методы отбора проб. – М. : Изд-во стандартов, 1977.
7. ГОСТ 11305-83. Методы определения влаги. – М. : Изд-во стандартов, 1985.
8. ГОСТ 11306-83 Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. – М. : Изд-во стандартов, 1985.
9. ГОСТ 11623-89. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения обменной и активной кислотности. – М. : Изд-во стандартов, 1991.
10. ГОСТ 10538-87 Топливо твердое. Методы определения химического состава золы : межгосударственный стандарт. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2003.
11. Домбровская, А. В. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе / А. В. Домбровская, М. И. Коренева, С. Н. Тюремнов. – М. : Госэнергоиздат, 1959.
12. СТБ 2308-2013 Торф. Термины и определения. – Минск : Госстандарт, 2013. – 56 с.
13. ГОСТ 10650-72. Торф. Методы определения степени разложения. – М. : Изд-во стандартов, 1974.
14. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975.
15. Кадастровый справочник торфяного фонда Белорусской ССР: Гомельская область. – Ч. 1–2. – Минск, 1979. – 325 с.
16. Схема рационального использования и охраны торфяных ресурсов БССР на период до 2010 года: Лельчицкий район Гомельской области. – Минск, 1989. – Кн. 11. – 121 с.
17. Лопотко, М. З., Сапропели в сельском хозяйстве / М. З. Лопотко, Г. А. Евдокимова, П. Л. Кузьмицкий. – Минск : Навука і тэхніка, 1992. – 216 с.
18. Ресурсосберегающая переработка торфо-сапропелевых смесей для получения экологобезопасных регуляторов роста растений / Г. В. Наумова [и др.] // Природные ресурсы. – 1997. – № 2. – С. 92–96.

References

1. STB 17.04.02–01–2010. *Okhrana okruzhayushchey sredy i prirodopol'zovaniye. Nedra. Sapropel'. Promyshlennogeneticheskaya klassifikatsiya* [Environmental protection and nature management. Bosom. Sapropel. Industrial-genetic classification]. Minsk, 2011. (in Russian)
2. Tomson A. E. *Torf i produkty yego pererabotki* [Peat and products of its processing]. Minsk, 2009, 328 p. (in Russian)
3. Gavril'chik A. P., Kashinskaya T. Ya. *Transformatsiya svoystv torfa pri antropogennom vozdeystvii* [Transformation of peat properties under anthropogenic impact]. Minsk, 2013, 305 p. (in Russian)
4. Pastukh O. N. *Effektivnost' organo-mineral'nykh guminovykh udobreniy Dobrin* [Efficiency of organo-mineral humic fertilizers Dobrin]. Omsk, 2008, pp. 22–23. (in Russian)
5. Komarov A. A. *Fiziologicheskoye deystviye na rasteniya gumatov, vkhodyashchikh v sostav kompleksnykh agro-adaptogenov* [Physiological effect on plants of humates, which are part of complex agro-adaptogens]. *Biologicheskii aktivnyye preparaty dlya rasteniyevodstva = Biologically active preparations for crop production*. Minsk, 2018, pp. 98–100. (in Russian)
6. GOST 5396-77. *Torf. Metody otbora prob* [Peat. Sampling methods]. Moscow, 1977. (in Russian)

7. GOST 11305-83. *Metody opredeleniya vlagi* [Moisture determination methods]. Moscow, 1985. (in Russian)
8. GOST 11306-83 *Torf i produkty yego pererabotki. Metody opredeleniya zol'nosti* [Peat and products of its processing. Methods for determining ash content]. Moscow, 1985. (in Russian)
9. GOST 11623-89. *Torf i produkty yego pererabotki dlya sel'skogo khozyaystva. Metody opredeleniya obmennoy i aktivnoy kislotnosti* [State Standard 11623-89. Peat and products of its processing for agriculture. Methods for determining exchange and active acidity]. Moscow, 1991. (in Russian)
10. GOST 10538-87. *Toplivo tverdoe. Metody opredeleniya khimicheskogo sostava zoly : mezhgosudarstvennyy standart* [State Standard 10538-87. Solid fuel. Methods for determining the chemical composition of ash : an interstate standard]. Moscow, 2003. (in Russian)
11. Dombrovskaya A. V., Koreneva M. I., Tyuremnov S. N. *Atlas rastitel'nykh ostatkov, vstrechayemykh v torfe* [Atlas of plant remains found in peat]. Moscow, 1959. (in Russian)
12. STB 2308-2013. *Torf. Terminy i opredeleniya* [State Standard of Belarus 2308-2013. Peat. Terms and Definitions]. Minsk, 2013, 56 p. (in Russian)
13. GOST 10650-72. *Torf. Metody opredeleniya stepeni razlozheniya* [State Standard 10650-72. Peat. Methods for determining the degree of decomposition]. Moscow, 1974. (in Russian)
14. Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnyie svoystva torfa i metody ih opredeleniya* [Basic properties of peat and methods for their determination]. Minsk, Science and technics, 1975.
15. *Kadastrivyy spravochnik torfyanogo fonda Belorusskoy SSR: Gomel'skaya oblast'* [Cadastral directory of the peat fund of the Byelorussian SSR: Gomel region]. Minsk, 1979, vol. 1–2, 325 p. (in Russian)
16. *Skhema ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany torfyanykh resursov BSSR na period do 2010 goda: Lel'chitskiy rayon Gomel'skoy oblasti* [Scheme for the rational use and protection of peat resources of the BSSR for the period up to 2010: Lelchitsky district of the Gomel region]. Minsk, 1989, book 11, 121 p. (in Russian)
17. Lopotko M. Z., Evdokimova G. A., Kuz'mickij P. L. *Sapropeli v sel'skom khozyaystve* [Sapropels in agriculture]. Minsk, 1992, 216 p. (in Russian)
18. Naumova G. V., Yunusova L. Z., Ovchinnikova T. F. [et al.]. *Resursosberegayushchaya pererabotka torfo-sapropel'nykh smesey dlya polucheniya ekologobezopasnykh regulyatorov rosta rasteniy* [Resource-saving processing of peat-sapropel mixtures to obtain environmentally friendly plant growth regulators]. *Prirodnyye resursy = Natural Resources*, 1997, no. 2, pp. 92–96. (in Russian)

Информация об авторах

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

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

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

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

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

Information about authors

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

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

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

Svetlana M. Seraya – 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

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

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОРГАНИЧЕСКОГО САПРОПЕЛЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ТОВАРНОЙ ПРОДУКЦИИ

В. Б. Кунцевич, Т. И. Макаренко, Б. В. Курзо, И. В. Агейчик, Л. П. Калилец

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. По фондовым и архивным материалам торфяных и сапропелевых ресурсов Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, проектных институтов водного хозяйства (БГХВ) и топливной промышленности («Белгипроторф»), полевых исследований ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси» выполнены анализ и оценка ресурсов органического сапропеля, залегающего на выбывших из эксплуатации торфяных месторождениях. Всего геологическими разведками различных категорий выявлено 224 выбывших из эксплуатации торфяных месторождения, где наряду с другими типами сапропеля имеется органический сапропель, объем которого суммарно составляет 162,6 млн м³.

В зависимости от соотношения площадей, занятых сапропелевой и торфяной залежами, мощности и качественного состава, сапропели по условиям добычи разделены на три группы: весьма перспективные, перспективные и условно перспективные.

Установлено, что под слоем оставшегося торфа на 26 месторождениях залегают сапропель исключительно органического типа.

На основании полученной информации разработаны база данных органического сапропеля в программе Microsoft Excel и схема размещения его залежей на выбывших из эксплуатации торфяных месторождениях Республики Беларусь.

Из всего перечня месторождений в результате анализа выделены и охарактеризованы сырьевые базы погребенного под торфом органического сапропеля, которые являются наиболее перспективными для разработки в ближайшем будущем.

Ключевые слова: торфяные и сапропелевые месторождения; ресурсы органического сапропеля; база данных; схема расположения; перспективные участки.

Для цитирования. Кунцевич В. Б., Макаренко Т. И., Курзо Б. В., Агейчик И. В., Калилец Л. П. Обоснование выбора месторождений органического сапропеля для разработки с целью получения товарной продукции // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 146–156.

RATIONALE FOR CHOOSING OF ORGANIC SAPROPEL DEPOSITS FOR THE DEVELOPMENT IN ORDER TO OBTAIN MARKETABLE PRODUCTS

V. B. Kuntsevich, T. I. Makarenko, B. V. Kurzo, I. V. Ageichik, L. P. Kalilets

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

Abstract. Based on fund and archival materials of peat and sapropel resources of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, design institutes for water management (DIWM) and the fuel industry ("Belgiprotorf"), field studies of the SSI "Institute of Nature Management of the NAS of Belarus", an analysis and assessment of the resources of organic sapropel occurring in peatlands exit of exploitation was carried out. In total, geological surveys of various categories revealed 224 peatlands exit of exploitation, where, along with other types of sapropel, there is organic sapropel, the total volume of which is 162.6 million m³.

Depending on the ratio of areas occupied by sapropel and peat deposits, thickness and quality composition, sapropels are divided into three groups according to the conditions of extraction: very promising, promising and conditionally promising.

It has been established that sapropel of an exclusively organic type lies under the layer of the remaining peat at 26 deposits.

Based on the information received, a database of organic sapropel was developed in the Microsoft Excel program and a scheme for placing its deposits on peatlands exit of exploitation of the Republic of Belarus.

The raw material bases of organic sapropel buried under peat were identified and characterized, which are the most promising for development in the near future, from the entire list of deposits, as a result of the analysis.

Keywords: peat and sapropel deposits; organic sapropel resources; database; layout; promising areas.

For citation: Kuntsevich V. B., Makarenko T. I., Kurzo B. V., Ageichik I. V., Kalilets L. P. Rationale for choosing of organic sapropel deposits for the development in order to obtain marketable products. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 146–156.

Введение. При производстве ряда продуктов комплексной переработки торфа важным дополнительным источником полезных свойств выпускаемой продукции является сапропель. Особенно эффективно использовать его как попутное сырье при добыче торфа, когда он залегают на разрабатываемых или выбывших из эксплуатации торфяных месторождениях. Выполненными ранее исследованиями показано, что добыча сапропеля на выбывших из эксплуатации участках (месторождениях), является более предпочтительной с энергетических позиций, чем освоение озерных отложений [1]. Кроме того, сапропелевое сырье под торфяной залежью не загрязнено поллютантами, содержит органического вещества и ценных микроэлементов больше, чем сапропели озер, имеет пониженную влажность. Особое внимание в исследованиях уделено наиболее ценным запасам органического сапропеля, зольность которого не превышает 30 %.

Объем запасов сапропеля определенного типа на торфяном месторождении подсчитывается пропорционально количеству отобранных проб. Для определения запасов сапропеля при условной 60%-й влажности осуществлен перерасчет объемов в массу с учетом влажности материала и плотности. Разделение запасов по типам выполнено согласно промышленно-генетической классификации, с учетом вещественного состава и описания характеристик сапропелей, полученных по отчетным материалам [2].

Определение качественного состава сапропелей под торфом проводится, как правило, по ограниченному количеству показателей – влажности, зольности, кислотности (pH), карбонатности (CaCO_3) и наличию железа, поэтому ресурсы сапропеля под торфом оценены по категории прогнозных: P_2 – при разведке торфяного месторождения на стадии поисков и предварительной разведки; P_1 – при разведке торфяного месторождения или его части на детальной стадии. На отдельных торфяных болотах выполнены поисково-оценочные работы и запасы сапропеля оценены по категории C_2 (предварительно оцененные).

Учитывая, что в последнее время значительный интерес к производству продукции на основе торфа и сапропеля проявляют как государственные учреждения, так и частные предприниматели, назрела необходимость определить наиболее перспективные для разработки залежи сапропелей, сложенные органическим типом.

Методы исследований. Анализ и оценка ресурсов, а также состава органического сапропеля выполнены по фондовым материалам Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь (далее – Минприроды), проектных институтов БГВХ (теперь – РУП «Белгидроводхоз»), и «Белгипроторф» (теперь – ГПНИИ «Белгипрогаз»), ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси». Особое внимание уделено объектам, которые исследованы в результате проведения детальных разведок в последние пять лет. Анализ отобранных проб по определению качественных характеристик торфа и сапропеля осуществлен в специализированных лабораториях.

Результаты исследований. За весь период исследований (1953–2021 гг.) на территории Республики Беларусь геологическими разведками различных категорий выявлено 224 выбывших из эксплуатации торфяных месторождения, где наряду с другими типами залегают органический сапропель, суммарный объем которого составляет 162,6 млн м^3 при условной 60%-й влажности.

С учетом условий залегания, вещественного состава и возможности добывать сапропель, все выработанные и разрабатывавшиеся торфоучастки, а также отдельные торфяные месторождения разделены на три группы: весьма перспективные, перспективные и условно перспективные (табл. 1) [3].

Весьма перспективные для разработки торфоучастки (торфяные месторождения) имеют в пределах выработанных участков площадь распространения сапропелей более 70 % и среднюю мощность озерных осадков более 0,5 м. Торф на таких участках существенно сработан.

Перспективные для разработки сапропеля торфоучастки имеют площадь распространения озерных отложений 30–70 % площади участка, среднюю мощность более 0,5 м. Основные запасы торфа над залежью сапропеля выработаны или сработка их завершается.

На условно перспективных участках донные отложения залегают, как правило, линзами в ограниченных местах, общая площадь которых составляет не более 30 % площади торфоучастков. Запасы торфа выработаны слабо или находятся на стадии разработки.

Таблица 1. Количество выбывших из эксплуатации торфяных месторождений с запасами сапропеля, разделенных по степени перспективности на группы

Table 1. The number of peatlands exit of exploitation with sapropel reserves, divided into groups according to the degree of prospects

Группа сапропелевой залежи на торфяных месторождениях	Количество торфяных месторождений по областям					
	Брестская	Витебская	Гомельская	Гродненская	Минская	Могилёвская
Весьма перспективные	6	64	6	7	8	5
Перспективные	14	63	23	7	32	16
Условно перспективные	24	59	37	28	52	36
<i>Всего</i>	44	186	66	42	92	57

Обычно органические сапропели составляют лишь долю от общих запасов, однако встречаются выработанные торфяные месторождения, где под оставшимся слоем торфа залегает сапропель исключительно органического типа (табл. 2).

Таблица 2. Ресурсы сапропеля, залегающего на выбывших из эксплуатации торфяных месторождениях, отнесенные только к органическому типу

Table 2. Resources of sapropel deposited on peatlands exit of exploitation classified only as organic

Район	Кадастровый номер	Месторождение или участок	Площадь, га		Средняя мощность сапропеля, м	Объем, тыс. м³ / Запас, тыс. т
			месторождения	сапропеля		
Витебская область						
Браславский	90	Горино	42,0	5,0	1,20	60/9
	106	Запруда	187,0	40,5	0,50	202/29
Верхнедвинский	20	Мосальщина	253,0	67,0	1,30	888/204
Витебский	1245	Борсуковское	91,0	52,0	0,90	468/123
Городокский	479	Большое	3475,0	267,0	1,00	2670/325
	618	Такавик	312,0	45,7	0,50	209/88
	643	Круговица	68,0	35,0	0,60	194/52
Лепельский	920	Романиха	47,0	21,5	1,40	303/65
Лиезненский	1359	Высочанский Бор	95,0	20,0	0,50	100/36
Полоцкий	400	Шестаново	124,0	6,0	0,50	30/8
Поставский	726	Лозовики	61,0	22,0	1,10	243/25
Сенненский	1436	Козинный Лоб	134,0	61,0	0,90	579/169
	1471	В пойме р. Чудинка	93,0	54,0	0,90	477/119
Шарковщинский	184	Мартиняты	133,0	25,0	0,50	125/14
Шумилинский	393	Чистик	1073,0	165,0	0,90	1659/321
Гомельская область						
Ветковский	67	Карчи	48,0	10,0	0,70	70/32
Калинковичский	934	Собино	89,0	36,0	0,40	131/47
Кормянский	198	Торфяной участок «Резки Поле»	43,2	33,0	1,10	546/267
Гродненская область						
Островецкий	28	Костевичи	72,0	45,0	0,70	302/78
Минская область						
Клецкий	361Н	Урведь	3,0	0,8	1,12	10,0/3,4
Узденский	6Н	Малевщина	127,0	10,0	0,65	65/24
Червенский	549	Красное	3322,0	665,0	0,60	3950/786
Могилёвская область						
Белыничский	126	Острова Дулебы	4950,0	359,0	1,10	3945/1420
Глусский	1624	Болота бассейна р. Доколька	302,0	10,0	0,90	90/19
Кировский	1364	Большое	290,0	100,0	0,30	300/69
Хотимский	1129	Ягодное	621,0	18,0	0,50	90/15

При определении запасов в пересчете на условную 60%-ую влажность, плотность органического сапропеля принята согласно [4].

Как видно из табл. 2, лишь на 26 выбывших из эксплуатации торфяных месторождениях (участках) сапропель представлен органическим типом с общим объемом 17,7 млн м³. В целом по республике разведано 487 торфяных месторождений, на которых возможна и целесообразна добыча сапропелей всех типов, объем которых составляет 584,0 млн м³.

Анализ табл. 2 показывает, что больше всего выработанных торфяных месторождений, на которых залегают сапропель только органического типа, находится в Витебской области, причем в Верхнедвинском, Городокском, Сеннинском и Шумилинском районах объемы сапропеля превышают 0,5 млн м³. На втором месте как по количеству месторождений, так и по объему органического сапропеля, находится Могилёвская область – четыре месторождения и 4,4 млн м³ общих запасов соответственно. В Брестской области выработанных торфяных месторождений, где сосредоточен сапропель только органического типа, нет.

Если применить критерии отбора и распределить представленные в табл. 2 месторождения по группам, очевидно, что только в Кормяном районе Гомельской области торфяной участок «Резки Поле» можно отнести к весьма перспективному для добычи сапропеля. Торфяные месторождения «Борсуковское», «Круговица», «Романиха», «Лозовики», «В пойме реки Чудинка» и «Костевичи» согласно принятой классификации относятся к перспективным, остальные месторождения – к условно перспективным.

На рис. 1 показаны суммарные ресурсы сапропеля на выбывших из эксплуатации торфяных месторождениях, сложенные исключительно органическим типом.

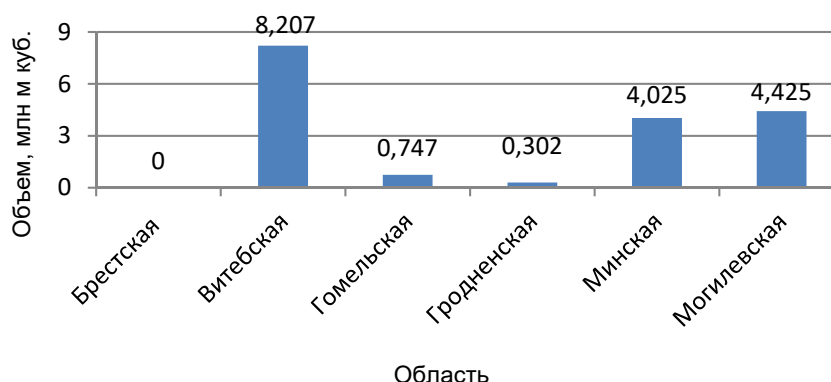


Рис. 1. Распределение органического сапропеля по областям на выбывших из эксплуатации торфяных месторождениях

Fig. 1. Distribution of organic sapropel by regions in peatlands exit of exploitation

В табл. 3 приведены данные о количестве выбывших из эксплуатации торфяных месторождений с запасами органического сапропеля.

Таблица 3. Количество торфяных месторождений и запасы органического сапропеля в разрезе областей

Table 3. Number of peat deposits and reserves of organic sapropel by regions

Область	Количество месторождений, шт.	Объем погребенного под торфом органического сапропеля, тыс. м ³	Область	Количество месторождений, шт.	Объем погребенного под торфом органического сапропеля, тыс. м ³
Брестская	13	4 455	Гродненская	8	2 517
Витебская	136	112 425	Минская	31	15 604
Гомельская	16	14 861	Могилёвская	20	12 729
			Итого	224	162 591

На основании полученных материалов авторами разработаны база данных в программе Microsoft Excel и схема размещения выработанных торфяных месторождений (участков) с запасами органического сапропеля (рис. 2).

В электронном виде отражена следующая информация: область и район расположения торфяного месторождения, площади всего месторождения и участка с сапропелем, площадь участка с органическим сапропелем, максимальная и средняя мощность сапропеля, общий объем и запас сапропеля, качественная характеристика, объем органического сапропеля, категория разведанности ресурсов, современное состояние торфяного месторождения (участка).

Как видно из табл. 2 и рис. 2 органический сапропель территориально распределен неравномерно. Самые большие его запасы находятся в Витебской области (112,4 млн м³), минимальные – в Гродненской области (2,5 млн м³). На остальные области суммарно приходится 47,7 млн м³.



Рис. 2. Схема размещения выбывших из эксплуатации торфяных месторождений с органическим сапропелем

Fig. 2. Scheme of placement of peatlands exit of exploitation with organic sapropel

Как было отмечено выше, все выработанные и разрабатывавшиеся торфоучастки и отдельные торфяные месторождения разделены на три группы: весьма перспективные, перспективные и условно перспективные. Основными критериями распределения месторождений по группам явились площадь распространения сапропелей в пределах выработанных участков и средняя мощность озерных остатков. Наряду с этим при выборе торфяного месторождения (участка) для разработки сапропелей следует учитывать и дополнительные факторы, в том числе наличие производственных мощностей и финансовых средств, необходимых для выполнения всего комплекса работ, связанных с добычей сырья,

производством и реализацией готовой продукции. Также должны учитываться обеспеченность района квалифицированными кадрами и рабочей силой, электроэнергией и водоснабжением. Важное значение при этом имеют категория геологических разведок и время их выполнения, от которых зависит точность определения количественных и качественных показателей запасов сапропеля исследованного объекта. Весьма желательно, чтобы регион располагал развитой сетью автомобильных и железных дорог, подъездными путями к разрабатываемому участку.

Учитывая изложенное, в качестве перспективных сырьевых баз, которые могут разрабатываться в ближайший период времени, предложены следующие объекты:

- 1) участок «Дубник-2» месторождения «Дубник» (кадастровый номер 389);
- 2) южный участок месторождения «Нивское» (кадастровый номер 1259);
- 3) участок «Млынок-2» месторождения «Удховда» (кадастровый номер 97);
- 4) участок «Озерище» месторождения «Большое» (кадастровый номер 479);
- 5) участок «Малевщина» месторождения «Малевщина» (кадастровый номер 6Н);
- 6) участок «Вороновка» месторождения «Вороновка» (кадастровый номер 198);
- 7) торфяное месторождение «Костевичи» (кадастровый номер 28).

Участок «Дубник-2» месторождения «Дубник». Участок «Дубник-2» расположен на торфяном месторождении «Дубник» Пинского района Брестской области на расстоянии 13,0 км от г. Пинска и 2,0 км от населенного пункта Большие Дворцы. По центру выбывшего из эксплуатации участка в южном направлении проходит улучшенная грунтовая дорога от д. Большие Дворцы, которая связана с центром сельского совета в д. Плещицы дорогой с покрытием. Населенный пункт Плещицы связан с райцентром автомобильной дорогой республиканского значения Р6 с усовершенствованным покрытием. В 15,0 км на север от участка разведки проходит железная дорога Брест – Пинск – Гомель. Ближайшая к торфяному месторождению железнодорожная станция Пинск с погрузочным терминалом расположена на север от него в 15,0 км. Имеющаяся дорожная сеть позволяет организовать подъезд к объекту автотранспорта и специализированной техники в любое время года со стороны д. Малые Дворцы. В 0,25 км на восток от границы разведанного участка в юго-западном направлении проходит воздушная линия электропередачи напряжением 10 кВ. Землепользователем участка является ОАО «Плещицы».

На торфяном месторождении «Дубник» в результате проведенных в 1952 г. Росторфразведкой маршрутных поисково-разведочных работ выявлен общий запас торфа в объеме 68 121 тыс. м³ (12,9 млн т при влажности 40 %). Площадь торфяной залежи в границе промышленной глубины 0,7 м составила 5773 га, средняя мощность торфа – 1,18 м. Установлено, что разведанный запас торфа имеет среднюю зольность 17 % и среднюю степень разложения 43 %. Пнистость залежи незначительная. Торфяное месторождение отнесено к низинному типу с древесно-тростниковым видом залежи.

В середине 1980-х – начале 1990-х годов на торфяном участке «Дубник-2» районным отделением ПО «Сельхозхимия» производилась заготовка торфа для нужд сельского хозяйства на общей площади около 300 га, которая была осушена открытой сетью картовых каналов, прорытых на расстоянии 40 м друг от друга. За более чем десять лет добычи торфяная залежь была сработана на глубину 0,6–1,0 м и добыча составила около 500 тыс. т торфа в пересчете на условную влажность. Запасы сапропеля остались практически не тронутыми.

В 2021 г. ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси» выполнена детальная разведка северо-восточной части участка «Дубник-2» с запасами сапропеля под слоем оставшегося торфа [5]. Площадь геологического отвода составила 62,5 га, площадь залежи торфа в промышленной границе – 52,5 га. Объем разведанного торфа – 475,89 тыс. м³, запас – 150,00 тыс. т при условной 40%-й влажности. Общие запасы сапропеля в пределах промышленной глубины 0,5 м залегают под торфом на площади 30,4 га и составляют 142,6 тыс. т при условной влажности 60 %. Сапропель участка «Дубник-2» представлен органическим и кремнеземистым типами, из них запас органического сапропеля в границе промышленной глубины составляет 115,5 тыс. м³, или 53,04 тыс. т в пересчете на 60%-ую влажность. Средняя зольность органического сапропеля – 18,0 %, влажность – 83,1 %.

Южный участок месторождения «Нивское». Торфяное месторождение «Нивское» расположено в Кличевском районе Могилёвской области. Доразведка выбывшего из эксплуатации южного участка выполнена ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси» в 2017 г. [6]. Участок детальной разведки площадью 20,9 га расположен в юго-восточной части торфяного месторождения «Нивское». От районного центра г. Кличева доразведанный участок находится на расстоянии 8,5 км, от д. Бацевичи – 6,0, от ближайшей железнодорожной станции Несета – 8,0 км. В настоящее время участок расположен на землях ГЛХУ «Кличевский лесхоз».

По территории района проходит железная дорога Осиповичи – Могилёв. Райцентр автодорогами связан с городами Березино, Бобруйском, Могилёвом.

Район электрифицирован. В 0,5 км на юг от границы доразведанного участка вдоль шоссейной дороги Бобруйск – Кличев проложена линия электропередачи напряжением 110 и 10 кВ. В 0,9 км на север от участка по центральной части торфяного месторождения «Нивское» проходит высоковольтная межгосударственная линия электропередачи напряжением 750 кВ.

В результате детальной разведки определены запасы торфа на площади 14,9 га в границе промышленной глубины, которые составили 143,04 тыс. м³, или 28,79 тыс. т в пересчете на условную влажность. Весь объем подсчитанных запасов торфа относится к категории балансовых. Балансовые запасы сапропеля подсчитаны на площади 16,3 га в границе промышленной глубины и составляют 182,89 тыс. м³, или 101,48 тыс. т в пересчете на влажность 60 %. Зольность сапропеля изменяется от 9,7 до 63,7 % и в среднем равна 40,6 %. На участке распространены органический, кремнеземистый, смешанный и карбонатный типы сапропеля.

Объем органического сапропеля, рассчитанный пропорционально исследованным образцам, составляет 32,27 тыс. м³, или 8,68 тыс. т при условной влажности 60 %. Средняя зольность органического сапропеля – 15,4 %, влажность – 90,1 %.

Участок «Млынок-2» месторождения «Удховда». Участок «Млынок-2» находится в юго-западной части торфяного месторождения «Удховда», которое расположено в Пружанском районе Брестской области. Детальная разведка участка выполнена ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси» в период с октября 2016 г. по апрель 2017 г. на площади 61,2 га. [7].

От районного центра г. Пружаны доразведанный участок расположен в 15,0 км на юго-восток, от д. Млынок – в 1,6 км на северо-запад. От ближайшей железнодорожной станции Оранчицы месторождение находится на расстоянии 4,5 км. Участок расположен на землях ГЛХУ «Пружанский лесхоз».

По территории района проходят: железная дорога Брест – Москва, автодороги Слоним – Высокое, Пружаны – Берёза, Свислочь – Пружаны, Гродно – Ивацевичи, Пружаны – граница Польши.

В 0,7 км от восточной границы участка «Млынок-2» проложена линия электропередачи, которая является участком линии электропередач напряжением 10 кВ (№ 562).

Запасы торфа подсчитаны на площади 35,3 га в границе промышленной глубины и составляют 282,4 тыс. м³, или 68,07 тыс. т. Весь объем подсчитанных запасов торфа относится к категории балансовых.

Влажность торфа на доразведанном участке изменяется от 79,2 до 88,2 % при среднем значении 84,5 %, средняя зольность составляет 8,7 %.

Общий объем балансовых запасов сапропеля на участке равен 198,73 тыс. м³, в том числе органического – 52,66 тыс. м³, или 18 тыс. т при условной влажности. Средняя зольность органического сапропеля – 18,09 %, влажность – 86,8 %.

Помимо рассмотренных выше участков, где выполнены новые геологоразведочные работы и которые предлагаются в качестве сырьевых баз на ближайшую перспективу, особый интерес представляют участки и месторождения, разведанные раньше, где под оставшимся слоем торфа залегает сапропель исключительно органического типа. В этом случае значительно упрощается технологический процесс его добычи, так как исключается вероятность перемешивания сапропелей различных типов, что приводит к увеличению зольности добытого сырья. Известно, что при производстве сельскохозяйственной продукции и грунтов различного назначения на основе торфа и сапропеля в большинстве случаев зольность не должна превышать 30 % [8]. Следовательно, для производства указанной продукции желательно иметь сапропель органического типа. Учитывая изложенное, а также территориальное расположение выбывших из эксплуатации месторождений, в качестве сырьевых баз на ближайшую перспективу помимо рассмотренных предлагаются следующие участки.

Участок «Озерище» месторождения «Большое». Торфяное месторождение «Большое» расположено в Городокском районе Витебской области. Детальная разведка категории «А» выполнена в 1956 г. Ленинградским отделением института «Росторфразведка». Месторождение находится на расстоянии 30 км от районного центра Городок, 1,5 км от с. Ключ и 9,0 км от железнодорожной станции Бычиха.

Площадь месторождения в границах промышленной глубины залежи составляет 704 га, участка «Озерище» – 122 га. Залежь сложена низинным торфом со средней степенью разложения 33 % и зольностью 8,7 %. По состоянию на 1 января 1978 г. балансовые запасы торфа на участке составляли 710 тыс. т при условной 40%-й влажности [9]. Расчетные запасы торфа на 1 января 2021 г. – 112,7 тыс. т при мощности оставшегося слоя торфа 0,6 м.

Площадь органического сапропеля на участке «Озерище» составляет 122 га, объем – 1220 тыс. м³, запас – 166 тыс. т [3].

Средние значения мощности слоя сапропеля, зольности и влажности равны 1,0 м, 10,2 % и 95,0 % соответственно.

Участок «Малевщина» месторождения «Малевщина». Торфяное месторождение «Малевщина» расположено в Узденском районе Минской области. Детальная разведка месторождения категории «А» выполнена институтом «Белгипроторф» в 1964 г. Месторождение находится на расстоянии 9,0 км от районного центра Узды и 0,5 км от с. Каменное. До ближайшей железнодорожной станции Койданово – 33,0 км. Площадь всего месторождения в границах промышленной глубины залежи составляет 119 га, участка «Малевщина» – 101 га. По состоянию на 1 января 1978 г. оставшиеся запасы торфа на месторождении составляли 103 тыс. т в пересчете на условную влажность [10]. Залежь низинного типа имеет степень разложения 42 % и среднюю зольность 12,4 %. С 1978 г. месторождение использовалось в сельскохозяйственном направлении для выращивания луговых трав. Известно, что

убыль торфа от минерализации в этом случае равна 9,8 т/га в год [11]. Следовательно, запас торфа на 1 января 2021 г. приблизительно равен 54 тыс. т, или 208 тыс. м³ (влажность залежи – 80 %, плотность – 0,802 т/м³).

Объем органического сапропеля на площади 10 га составляет 65 тыс. м³, запас – 24 тыс. т [3]. Максимальная зольность сапропеля – 29,4 % влажность – 86,5 %, средняя мощность сапропеля – 0,65 м.

Участок «Вороновка» месторождения «Вороновка». Торфяное месторождение «Вороновка» расположено в Кормянском районе Гомельской области. Детальная разведка категории «А» выполнена институтом «Белпромпроект» в 1948 г. Месторождение находится на расстоянии 13,5 км от районного центра Корма и 0,5 км от с. Вороновка. До ближайшей железнодорожной станции «Буда-Кошелево» – 37,0 км. Площадь месторождения в границах промышленной глубины залежи составляет 191 га, в том числе участка «Вороновка» – 26 га. По состоянию на 1 января 1978 г. запасы торфа на месторождении составили 284 тыс. т [12]. Оставшийся слой мощностью 0,5 м сложен низинным торфом со степенью разложения 34 % и средней зольностью 11,6 %. По состоянию на 1 января 2021 г. расчетные запасы торфа ориентировочно составляли 202 тыс. т, или 808 тыс. м³ (средняя влажность залежи – 80 %, плотность – 0,772 т/м³).

Органический сапропель залегает под торфом на площади 13 га. Объем сапропеля – 546 тыс. м³, запас – 267 тыс. т. [3]. Максимальная зольность сапропеля – 26,6%, влажность – 82,0 %.

Торфяное месторождение «Костевичи». Торфяное месторождение «Костевичи» расположено в Островецком районе Гродненской области. Детальная разведка месторождения категории «А» выполнена институтом «Белгипроторф» в 1968 г. Месторождение находится на расстоянии 37,0 км от районного центра Островец, 0,5 км от с. Костевичи и 31,0 км от железнодорожной станции Пабраде. Площадь месторождения в границах промышленной глубины залежи составляет 59 га. По состоянию на 1 января 1978 г. запасы торфа определены в количестве 239 тыс. т [13]. Залежь преимущественно низинного типа, степень разложения – 31 % и средняя зольность – 7,6 %. По состоянию на 1 января 2021 г. торфяная залежь существенно выработана, мощность оставшегося защитного слоя торфа – 0,5 м, объем торфа – 36 тыс. м³, запас – 8,9 тыс. т. при средней влажности залежи 80 % и плотности 0,742 т/м³.

Органический сапропель залегает под слоем торфа на площади 45 га при средней мощности 0,67 м, объем составляет 302 тыс. м³, запас – 78 тыс. т. Средние значения зольности, влажности и плотности сапропеля равны 17,1 %, 90,2 % и 7,1 ед. соответственно [3].

В результате анализа опубликованных данных и их статистической обработки произведен выбор сырьевых баз погребенного под торфом органического сапропеля, которые могут разрабатываться в ближайшей перспективе (табл. 4).

Как видно из табл. 4 перспективные сырьевые базы погребенного под торфом органического сапропеля представлены во всех областях Республики Беларусь.

Таблица 4. Рекомендуемые для разработки сырьевые базы погребенного под торфом сапропеля и их характеристики

Table 4. Recommended for the development of raw material bases of sapropel buried under peat and their characteristics

Область, район	Участок	Площадь сапропеля, га	Объем, тыс. м ³ Запас, тыс. т		Средняя зольность сапропеля, %
			торф	сапропель	
Брестская, Пинский	Дубник-2	30,4	<u>476</u> 150	<u>116</u> 53	18,0
Могилевская, Кличевский	Нивское	16,3	<u>143</u> 29	<u>32</u> 9	15,4
Брестская, Пружанский	Млынок-2	34,8	<u>282</u> 68	<u>52</u> 18	18,1
Витебская, Городокский	Озерище	122,0	<u>451</u> 113	<u>1220</u> 166	10,2
Минская, Узденский	Малевщина	10,0	<u>208</u> 54	<u>65</u> 24	29,4 (макс.)
Гомельская, Кормянский	Вороновка	13,0	<u>808</u> 202	<u>546</u> 267	26,6 (макс.)
Гродненская, Островецкий	Костевичи	45,0	<u>36</u> 9	<u>302</u> 78	17,1

Необходимо отметить, что зольность торфяной залежи на всех рекомендуемых участках не превышает 17 %, а минимальное значение (месторождение «Костевичи») составляет 7,6 %. Если учесть, что при производстве большинства продукции на основе торфа и сапропеля содержание последнего в смеси не превышает 30 % по массе, тогда есть основание утверждать, что в таких случаях допускается смешивать органический сапропель с сапропелем других типов. При этом необходимо иметь в виду, что зольность произведенного из торфа и сапропеля продукта не должна превышать предельных значений, указанных в нормативно-технической документации на данный вид продукции.

Заключение. По фондовым и архивным материалам Минприроды, проектных институтов БГХВ и «Белгипроторф», полевых изысканий ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси» выполнены анализ и оценка ресурсов наиболее ценного в практическом отношении органического сапропеля, залегающего на выбывших из эксплуатации торфяных месторождениях.

Установлено, что геологическими разведками различных категорий выявлено 224 выбывших из эксплуатации торфяных месторождения, где наряду с другими типами сапропелей залегают органический сапропель с запасами 162,6 млн м³. Также установлено, что на 26 месторождениях под слоем оставшегося торфа залегают сапропель исключительно органического типа, объем которого равен 17,7 млн м³.

На основании анализа изученных материалов авторами разработаны база данных органического сапропеля в системе Microsoft Excel и схема расположения его залежей на выбывших из эксплуатации торфяных месторождениях Республики Беларусь.

В целях упрощения принятия решения о выборе перспективного для разработки торфяного месторождения с запасами сапропеля все выработанные торфоучастки и отдельные торфяные месторождения разделены на три группы: весьма перспективные, перспективные и условно перспективные [3]. Основными критериями распределения месторождений по группам явились площадь распространения сапропеля в пределах выработанных участков и средняя мощность озерных осадков. Наряду с этим при выборе месторождения для разработки существенное значение имеют и дополнительные факторы: наличие производственных мощностей и финансовых средств, достаточных для выполнения всего комплекса работ, связанных с добычей сырья, производством и реализацией готовой продукции; обеспеченность квалифицированными кадрами и рабочей силой, электроэнергией и водоснабжением. Важное значение при этом имеют категория геологических разведок и время их выполнения, от которых зависит точность определения количественных и качественных показателей исследованного объекта.

Учитывая изложенное, в качестве сырьевых баз погребенного под торфом органического сапропеля, которые могут разрабатываться в ближайшей перспективе, предложено семь первоочередных месторождений (участков), расположенных в каждой из шести областей Республики Беларусь.

Список использованных источников

1. 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.
2. Охрана окружающей среды и природопользование. Недра. Сапропель. Промышленно-генетическая классификация. СТБ 17.04.02-01-2010. – Введен 01.07.2011. – Минск, 2010. – 12 с.
3. Справочник ресурсов сапропеля на выработанных торфяных месторождениях. – Минск, 2000. – 102 с.
4. Рубинштейн, А. Я. Биогенные грунты / А. Я. Рубинштейн. – М. : Наука, 1986. – 85 с.
5. Отчет о детальной разведке торфа и сапропеля в северо-восточной части участка «Дубник-2» месторождения «Дубник» Пинского района Брестской области с подсчетом запасов по состоянию на 20.05.2021 г. : отчет о НИР / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск, 2021. – 145 с. – № ГР 780-1-20/22.
6. Отчет о доразведке торфа и сапропеля на южном выбывшем из эксплуатации участке торфяного месторождения «Нивское» Кличевского района Могилевской области с подсчетом запасов по состоянию на 20.08.2017 г. : отчет о НИР / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск, 2017. – 150 с. – № ГР 609-6-17/19.
7. Отчет о доразведке торфа и сапропеля на участке «Млынок-2» торфяного месторождения «Удховда» Пружанского района Брестской области с подсчетом запасов по состоянию на 20.03.2017 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск, 2017. – 154 с. – № ГР 593-1-16/18.
8. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
9. Торфяной фонд Белорусской ССР : Кадастровый справочник : по состоянию разведанности на 1 января 1978 г. Витебская область / Управление государственного торфяного фонда «Госторффонд» при Госплане БССР. – Минск, 1979.

10. Торфяной фонд Белорусской ССР : Кадастровый справочник : по состоянию разведанности на 1 января 1978 г. Минская область / Управление государственного торфяного фонда «Госторффонд» при Госплане БССР. – Минск, 1979.
11. Бамбалов, Н. Н. Роль болот в биосфере / Н. Н. Бамбалов, В. А. Ракович. – Минск : Беларуская навука, 2005. – 285 с.
12. Торфяной фонд Белорусской ССР : Кадастровый справочник : по состоянию разведанности на 1 января 1978 г. Гомельская область / Управление государственного торфяного фонда «Госторффонд» при Госплане БССР. – Минск, 1979.
13. Торфяной фонд Белорусской ССР : Кадастровый справочник : по состоянию разведанности на 1 января 1978 г. Гродненская область / Управление государственного торфяного фонда «Госторффонд» при Госплане БССР. – Минск, 1979.

References

1. Kurzo B. V., Krakovetsky A. V. *Rajonirovanie territorii Belarusi po prigodnosti zapasov torfa i zalegayushchego sovmestno s nim sapropelya dlya vypuska produkci 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)
2. STB 17.04.02-01-2010 *“Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Nedra. Sapropel'. Promyshlennno-geneticheskaya klassifikaciya”* [Environmental protection and nature management. Bosom. Sapropel. Industrial-genetic classification]. Minsk, 2010. (in Russian)
3. *Spravochnik resursov sapropelya na vyrabotannyh torfyanyh mestorozhdeniyah* [Reference book of sapropel resources in depleted peat deposits]. Minsk, 2000, 102 p. (in Russian)
4. Rubinshtejn A. Ya. *Biogennye grunty* [Biogenic soils]. Moscow, Science Publ., 1986, 85 p. (in Russian)
5. *Otchet o detal'noj razvedke torfa i sapropelya v severo-vostochnoj chasti uchastka «Dubnik-2» mestorozhdeniya «Dubnik» Pinskogo rajona Brestskoj oblasti s podschetom zasobov po sostoyaniyu na 20.05.2021 g.* [Report on detailed exploration of peat and sapropel in the north-eastern part of the Dubnik-2 site of the Dubnik deposit, Pinsk district, Brest region, with a calculation of reserves as of May 20, 2021]. *Otchet o NIR* [Research report]. State Scientific Institution Institute of Nature Management of the NAS of Belarus. Minsk, 2021. 145 p. St. Reg. no. 780-1-20/22. (in Russian)
6. *Otchet o dorazvedke torfa i sapropelya na yuzhnom vybyvshem iz ekspluatatsii uchastke torfyanogo mestorozhdeniya «Nivskoe» Klichevskogo rajona Mogilevskoj oblasti s podschetom zasobov po sostoyaniyu na 20.08.2017 g.* [Report on the additional exploration of peat and sapropel at the southern decommissioned site of the Nivskoye peat deposit in the Klichevsky district of the Mogilev region with a calculation of reserves as of 20.08.2017]. *Otchet o NIR* [Research report]. State Scientific Institution Institute of Nature Management of the NAS of Belarus. Minsk, 2017. 150 p. St. Reg. no. 609-6-17/19. (in Russian)
7. *Otchet o dorazvedke torfa i sapropelya na uchastke «Mlynok-2» torfyanogo mestorozhdeniya «Udhovda» Pruzhanskogo rajona Brestskoj oblasti s podschetom zasobov po sostoyaniyu na 20.03.2017 g.* [Report on the additional exploration of peat and sapropel at the Mlynok-2 site of the Udhovda peat deposit, Pruzhany district, Brest region, with a calculation of reserves as of March 20, 2017]. *Otchet o NIR* [Research report]. State Scientific Institution Institute of Nature Management of the NAS of Belarus. Minsk, 2017. 154 p. St. Reg. no. 593-1-16/18. (in Russian)
8. Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ih opredeleniya* [The main properties of peat and methods for their determination]. Minsk, Science and technology Publ., 1975, 320 p. (in Russian)
9. *Torfyanoj fond Belorusskoj SSR : Kadastryj spravochnik : po sostoyaniyu razvedannosti na 1 yanvarya 1978 g. Vitebskaya oblast'* [Peat fund of the Byelorussian SSR: Cadastral directory: as of exploration as of January 1, 1978. Vitebsk region]. *Upravlenie gosudarstvennogo torfyanogo fonda «Gostorffond» pri Gosplane BSSR* [Department of the State Peat Fund "Gostorffond" under the State Planning Committee of the BSSR]. Minsk, 1979. (in Russian)
10. *Torfyanoj fond Belorusskoj SSR : Kadastryj spravochnik : po sostoyaniyu razvedannosti na 1 yanvarya 1978 g. Minskaya oblast'* [Peat fund of the Byelorussian SSR: Cadastral directory: as of exploration as of January 1, 1978. Minsk region]. *Upravlenie gosudarstvennogo torfyanogo fonda «Gostorffond» pri Gosplane BSSR* [Department of the State Peat Fund "Gostorffond" under the State Planning Committee of the BSSR]. Minsk, 1979. (in Russian)
11. Bambalov N. N., Rakovich V. A. *Rol' bolot v biosfere* [The role of swamps in the biosphere]. Minsk, Belarusian Science Publ., 2005, 285 p. (in Russian)
12. *Torfyanoj fond Belorusskoj SSR : Kadastryj spravochnik : po sostoyaniyu razvedannosti na 1 yanvarya 1978 g. Gomel'skaya oblast'* [Peat fund of the Byelorussian SSR: Cadastral directory: as of exploration as of January 1, 1978. Gomel region]. *Upravlenie gosudarstvennogo torfyanogo fonda «Gostorffond» pri Gosplane BSSR* [Department of the State Peat Fund "Gostorffond" under the State Planning Committee of the BSSR]. Minsk, 1979. (in Russian)
13. *Torfyanoj fond Belorusskoj SSR : Kadastryj spravochnik : po sostoyaniyu razvedannosti na 1 yanvarya 1978 g. Grodnenskaya oblast'* [Peat fund of the Byelorussian SSR: Cadastral directory: as of exploration as of January 1, 1978. Grodno region]. *Upravlenie gosudarstvennogo torfyanogo fonda «Gostorffond» pri Gosplane BSSR* [Department of the State Peat Fund "Gostorffond" under the State Planning Committee of the BSSR]. Minsk, 1979. (in Russian)

Информация об авторах

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

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

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

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

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

Information about the authors

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

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

Boris V. Kurzo – D. Sc. (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

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

Lyudmila P. Kalilets – 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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-157-165>
УДК 582.284:66.081.3

Поступила в редакцию 7.04.2022
Received 7.04.2022

СВЯЗЫВАНИЕ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ МИЦЕЛИЕМ ГРИБОВ РОДА *ASPERGILLUS*, КОЛОНИЗИРУЮЩИХ КАРТОН

А. Э. Томсон¹, Т. В. Соколова¹, И. А. Гончарова²,
А. А. Арашкова³, Н. Е. Сосновская¹, В. С. Пехтерева¹

¹Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

²Белорусский научно-исследовательский институт

документоведения и архивного дела, Минск, Беларусь;

³Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Изучено влияние антисептической обработки и высушивания на сорбционную способность ксеротолерантных грибов *A. niger*, *A. ochraceus* и *A. versicolor*, выделенных из очагов плесневого поражения картонных архивных коробок. Воздействие 2%-го раствора бензалкония хлорида (ВАС), приводящее к быстрой потере жизнеспособности мицелия, повысило сорбционную емкость грибного мицелия по отношению к ионам меди, цинка и свинца, а обработка 0,5%-м раствором биоцида, замедляющая рост грибов без полного ингибирования, несколько снижала связывание тяжелых металлов. Значительное снижение сорбционной емкости наблюдалось лишь после снижения влажности сорбентов до 12–15 %. У высушенной (после обработки 0,5%-м ВАС) биомассы *A. versicolor* сорбционная емкость по отношению к ионам меди, цинка и свинца снизилась по сравнению с влажной биомассой после обработки 2,0%-м ВАС в 17,4, 18,7 и 24,6 раза соответственно.

Ключевые слова: плесневые грибы; картон; тяжелые металлы; сорбция; влажность сорбента.

Для цитирования. Томсон А. Э., Соколова Т. В., Гончарова И. А., Арашкова А. А., Сосновская Н. Е., Пехтерева В. С. Связывание ионов тяжелых металлов мицелием грибов рода *Aspergillus*, колонизирующих картон // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 157–165.

BINDING OF HEAVY METAL IONS BY ASPERGILLUS MYCELIUM COLONIZING CARDBOARD

A. E. Tomson¹, T. V. Sokolova¹, I. A. Gontcharova²,
A. A. Arashkova³, N. E. Sosnovskaya¹, V. S. Pekhtereva¹

¹Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

²Belarusian Research Institute of Records Management and Archival Studies, Minsk, Belarus;

³Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The effect of antiseptic treatment and drying on the sorption capacity of xerotolerant fungi *A. niger*, *A. ochraceus* and *A. versicolor* isolated from mold lesions in cardboard archival boxes was studied. Exposure to a 2 % solution of benzalkonium chloride (BAC), leading to a rapid loss of mycelium viability, increased the sorption capacity of the fungal mycelium with respect to copper, zinc, and lead ions, and treatment with a 0.5 % biocide solution, which slowed down the growth of fungi without complete inhibition, somewhat reduced binding of heavy metals. A significant decrease in the sorption capacity was observed only after the moisture content of the sorbents was reduced to 12–15 %. In dried (after treatment with 0.5 % BAC) *A. versicolor* biomass, the sorption capacity in relation to copper, zinc and lead ions decreased compared to wet biomass (after treatment with 2.0 % BAC) by 17.4, 18.7 and 24.6 times respectively.

Keywords: mould fungi; cardboard; heavy metals; sorption; sorbent moisture.

For citation. Tomson A. E., Sokolova T. V., Gontcharova I. A., Arashkova A. A., Sosnovskaya N. E., Pekhtereva V. S. Binding of heavy metal ions by aspergillus mycelium colonizing cardboard. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 157–165.

Введение. Одним из направлений экологической политики, направленной на сохранение биоресурсов, является повышение уровня регенерации макулатуры, 1 т которой заменяет 2–3 м³ древесины. Использование макулатуры, вывозимой на свалки, может на четверть уменьшить объем твердых бытовых отходов. Предприятия, перерабатывающие макулатуру, потребляют значительно

меньше воды, химикатов, энергоносителей, чем производства полного цикла [1]. Однако наряду с очевидными экологическими и экономическими преимуществами при использовании макулатуры возникает и ряд сложностей. Необходимым условием безаварийной работы оборудования и получения продукции требуемого качества является контроль загрязненности макулатуры [2].

Вопросы, связанные со сбором и утилизацией макулатуры, регулирует ГОСТ 10700-97. В перечне загрязнений, которых не должно быть в макулатуре, включены минералы, удобрения, краски, детергенты, однако их количество, химический состав и способы контроля не конкретизируются [3].

Экологичность макулатурного сырья, учитывая возможность его многократного использования, оказывает решающее влияние на безопасность конечной продукции. При выборочных проверках во вторичной упаковке пищевых продуктов неоднократно выявляли высокое содержание токсичных металлов [4, 5]. Опасность ухудшения экологической безопасности картона значительно возрастает в присутствии плесневых грибов, обладающих высокой сорбирующей активностью по отношению к ионам тяжелых металлов [6]. Способность биомассы грибов связывать ионы металлов широко варьирует между различными грибами и для различных металлов. На протекание процесса биосорбции влияет целый спектр факторов: структура клеточной стенки, pH раствора, концентрация ионов металлов, тип иона, его молекулярная масса, заряд и др.

Целлюлозные материалы являются природным питательным субстратом для грибов. Основным фактором, регулирующим их активность, является влажность. Для предотвращения роста микроорганизмов на картонно-бумажных отходах влажность макулатуры согласно ГОСТ 10700-97 должна быть не более 15 %. Бактерии в таких условиях развиваться не могут, в то время как микроскопические грибы благодаря генетическому потенциалу обладают способностью адаптироваться к экстремальным условиям внешней среды. Гриб *Aspergillus carbonarius*, выделенный из толщи картона средств архивного хранения, обладает возможностью выживания в условиях низкой влажности за счет синтеза меланина и выделения в окружающую среду значительного количества меланизированного экссудата, увлажняющего целлюлозный субстрат. Мицелий гриба и экзомеланин характеризуются высокой сорбционной способностью по отношению к ионам металлов, содержащимся в пигментах типографских красок [7].

Плесневые грибы, способные развиваться в условиях низкой влажности, представляют особую опасность для объектов библиотечного, музейного и архивного хранения. Для их защиты от внешних воздействий широко используют картонные коробки, которые при форс-мажорных обстоятельствах или нарушении температурно-влажностного режима колонизируются микроскопическими грибами [8]. Пораженные коробки, которые больше не могут быть использованы для хранения документов, обычно сдают в макулатуру, предварительно обработав антисептическими растворами с последующим высушиванием.

Цель работы – оценить сорбирующую способность по отношению к ионам тяжелых металлов сырой и высушенной биомассы ксеротолерантных плесневых грибов после биоцидного воздействия.

Методы исследования. Объектами исследования служили грибные изоляты, выделенные из пылевидных налетов на архивных коробках. Культивирование грибов проводили в жидкой или агаризованной среде Чапека – Докса.

Активность воды (a_w) регулировали внесением в среду различных концентраций хлорида натрия [9]. Ксеротолерантность плесневых грибов определяли по способности расти в широком диапазоне a_w , включая экстремально низкие значения ($a_w = 0,85$), создаваемые путем внесения в среду 17%-го раствора NaCl [10]. Критерием ростовой активности служил выход биомассы в газонной культуре. Мицелий отделяли от агаризованной среды горячим фильтрованием после 1-минутного кипячения в большом количестве воды. Выход биомассы рассчитывали как отношение абсолютно сухих веществ мицелия к единице площади агаризованной среды.

Устойчивость грибного мицелия к токсическому действию биоцидов оценивали по длительности лаг-фазы, определяемой по времени от посева до видимого проявления жизнедеятельности. Инокулятом служили пеллеты 5-суточной глубинной культуры, перенесенные из жидкой питательной среды в водные растворы бензилдиметилалкиламмоний хлорида (ВАС). После определенного времени экспозиции пеллеты извлекали, промывали в стерильной воде и помещали в чашки Петри с агаризованной питательной средой. За окончание лаг-фазы принимали появление на пеллете опушенности. При длительности лаг-фазы более 10 сут считали, что гриб утратил свою жизнеспособность.

Высушивание грибных пеллет при оценке влияния влажности мицелия на выживаемость проводили с соблюдением стерильности, помещая их на сухие бумажные фильтры, находящиеся в чашках Петри. Влажность рассчитывали по отношению к абсолютно сухому мицелию, который получали путем высушивания до постоянной массы при температуре 105 °С. При изучении сорбционных свойств мицелий высушивали аналогичным образом в нестерильных условиях, влажность сырого мицелия составляла 50–60 %, сухого – 12–15 %.

Сорбцию тяжелых металлов грибным мицелием оценивали после 5 сут культивирования грибов в колбах Эрленмейера по статической обменной емкости (СОЕ) из растворов сернокислых солей меди, никеля, свинца и цинка. 0,5 г биомассы заливали 50 мл раствора сорбата с концентрацией 100 мг/л, выдерживали 1 ч при периодическом перемешивании при комнатной температуре. Содержание ионов металлов в пробах до и после сорбции анализировали методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Сорбционную емкость рассчитывали по формуле

$$S = (C_{\text{исх.}} - C_{\text{равн.}}) V_{\text{раст.}} / m_{\text{сорб.}}, \quad (1)$$

где S – сорбционная емкость, мг/г; $C_{\text{исх.}}$ и $C_{\text{равн.}}$ – исходная и равновесная концентрации соответственно, мг/мл; $V_{\text{раст.}}$ – объем исследуемого раствора, мл; $m_{\text{сорб.}}$ – масса сорбента, г. Навеску сорбента пересчитывали на абсолютно сухую массу.

При снижении концентрации сорбата до 10 мг/л, в качестве сорбционной характеристики использовали коэффициент распределения, мл/г:

$$K_d = S / C_{\text{равн.}}$$

Приведенные данные являются средними арифметическими 3–5 повторностей опытов.

Результаты и их обсуждение. Микологические обследования средств архивного хранения показали, что картонные коробки, оклеенные сверху декоративной бумагой, легко подвержены колонизации микроскопическими грибами. Обширные колонии формировали чаще всего представители рода *Aspergillus*, светлый мицелий которых было сложно отличить от обычных пылевых налетов.

Ксерофильных штаммов, способных развиваться исключительно в условиях низкой доступности воды, среди изолятов данного рода выявлено не было. Ксеротолерантными свойствами обладали изоляты, отнесенные к видам *A. versicolor*, *A. ochraceus* и *A. niger*. Они проявили способность расти и формировать генеративные органы в присутствии 17%-го раствора NaCl, хотя максимальный выход биомассы с единицы площади газонной культуры был на среде с более низкими значениями соли. Наиболее высокую степень ксеротолерантности проявил *A. versicolor*, у которого на среде 12%-го раствора NaCl наблюдался максимальный выход биомассы газона (рис. 1).

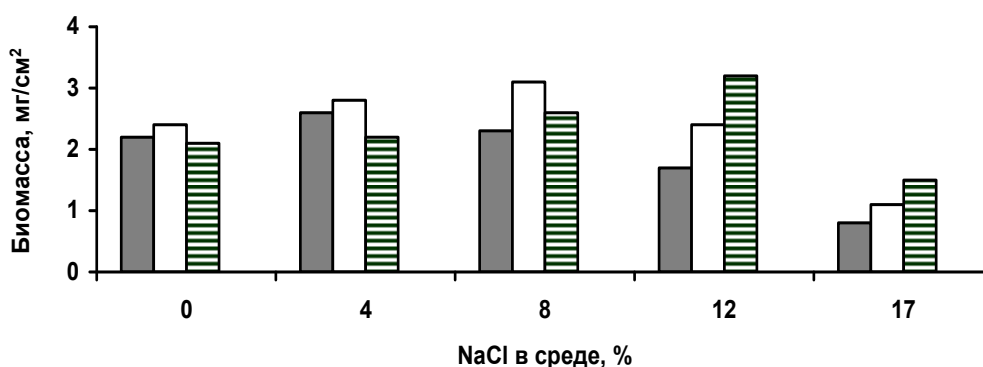


Рис. 1. Выход биомассы газонной культуры *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (=), выделенных из очагов плесневого поражения архивных коробок после 7 сут культивирования при 28 °C на среде Чапека – Докса с различным содержанием NaCl

Fig. 1. Yield of lawn culture biomass of *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (=) isolated from mold lesions of archival boxes after 7 days of cultivation at 28 °C on Czapek – Dox medium with different NaCl content

Для борьбы с плесневыми грибами чаще всего используют химическую обработку. Широкое распространение получили составы, антимикробная активность которых обусловлена присутствием четвертичного аммониевого соединения (ЧАС) бензалкониум хлорида в концентрации 1–2 %. Покоящиеся споры микроскопических грибов, в отличие от вегетативного мицелия, характеризуются высокой устойчивостью к негативному воздействию факторов внешней среды, включая биоциды. Проведенные ранее исследования выявили, что даже при экстремально высоких концентрациях ЧАС некоторые грибные споры сохраняют свою жизнеспособность. В 10%-м растворе бензалкониум хлорида 99,5 % спор *A. niger* погибло уже после 1-минутной экспозиции, но 0,5 % сохранили жизнеспособность и при длительном

воздействии биоцида. При этом происходила селекция резистентных штаммов с высокой повреждающей способностью и устойчивостью к внешним воздействиям [11].

Чтобы избежать возможных негативных последствий биоцидной обработки, пораженные поверхности следует тщательно очищать от плесневых спор, которые обычно находятся на поверхности и могут быть удалены механически. В отличие от спор мицелиальные гифы проникают вглубь картона, оплетая целлюлозные волокна.

Токсический эффект антисептических составов, зависящий от концентрации биоцида и длительности контакта, проявляется в увеличении длительности лаг-фазы, во время которой происходит незаметная внешне перестройка метаболизма гриба, направленная на преодоление организмом негативного воздействия. При обработке картона, как и других пористых материалов, исследованы концентрации, которые реально будут воздействовать на мицелий, находящийся в глубине, где он будет ослабевать. Поэтому концентрацию биоцида варьировали от 0,1 до 2,0 %, а время экспозиции – от 20 до 60 мин.

Результаты исследования показали, что при воздействии 2,0%-й концентрации ВАС мицелий теряет жизнеспособность уже через 20 мин контакта, а при 0,5%-й концентрации ВАС сохраняет ее даже после 60 мин экспозиции. Вышеуказанные условия воздействия считали ингибирующими и субингибирующими соответственно (табл. 1).

Таблица 1. Влияние концентрации бензалкониум хлорида (ВАС) и длительности воздействия на жизнеспособность плесневых грибов

Table 1. Influence of benzalkonium chloride (BAC) concentration and duration of exposure on mold viability

Гриб	Лаг-фаза, сут							
	0,1%-ая ВАС		0,5%-ая ВАС		1,0%-ая ВАС		2,0%-ая ВАС	
	20 мин	60 мин	20 мин	60 мин	20 мин	60 мин	20 мин	60 мин
<i>A. niger</i>	<3	4	3	<10	7	>10	>10	>10
<i>A. ochraceus</i>	<3	5	4	10	10	>10	>10	>10
<i>A. versicolor</i>	<3	4	3	7	4	>10	>10	>10

Биоцидная обработка приостанавливает развитие грибов, но для предотвращения их развития на картоне в дальнейшем он должен быть подвергнут сушке. Опытным путем было установлено, что при снижении влажности ниже 15 % мицелий исследованных грибов полностью теряет способность к прорастанию во всех вариантах.

В исследовании влияния антисептической обработки и высушивания на аккумуляцию грибом мицелием ионов тяжелых металлов в качестве сорбата использовали соли меди, цинка и свинца. Ионы этих металлов больше других мигрируют в воду из сдаваемых в макулатуру одноразовых бумажных стаканчиков [12], школьных тетрадей [13], издательской продукции для детей [14].

Результаты экспериментов показали, что сорбционная емкость сырого мицелия грибов-контаминантов по отношению к ионам меди после обработки биоцидом в ингибирующей концентрации увеличилась по сравнению с контролем, а в субингибирующей концентрации незначительно уменьшилась (рис. 2).

Механизмы связывания металлов живой биомассой грибов существенно отличаются от процессов, происходящих в мертвой биомассе. Если в живом мицелии работают два различных механизма: поверхностная сорбция металлов и их энергозависимое внутриклеточное связывание, то в нежизнеспособной биомассе наблюдаются только физико-химические процессы сорбции металлов поверхностными структурами [15]. В основе поверхностной сорбции ионов тяжелых металлов грибной биомассой лежит их взаимодействие с биополимерами клеточной стенки, которая имеет оптимальную структуру для физико-химического связывания катионов тяжелых металлов [16].

Вероятно, при высокой токсической нагрузке у грибов быстро прекращается жизнедеятельность, но клеточная стенка в основном сохраняет свою пространственную структуру и свойства. Грибная биомасса, утрачивая защитные функции живого организма, начинает выполнять функцию химического сорбента, в котором обменные процессы протекают более интенсивно, чем в биологических системах. Это предположение подтвердили результаты изучения сорбции ионов меди биомассой *A. niger* в динамике. При использовании в качестве сорбента нативного мицелия система достигала состояния динамического равновесия через 25 мин, а после его обработки 2%-м раствором бензалкониум хлорида – через 15 мин. После уменьшения концентрации биоцида до 0,5 % сорбционная активность обработанного мицелия снизилась, динамическое равновесие в системе сорбент – сорбат наступило лишь через 40 мин.

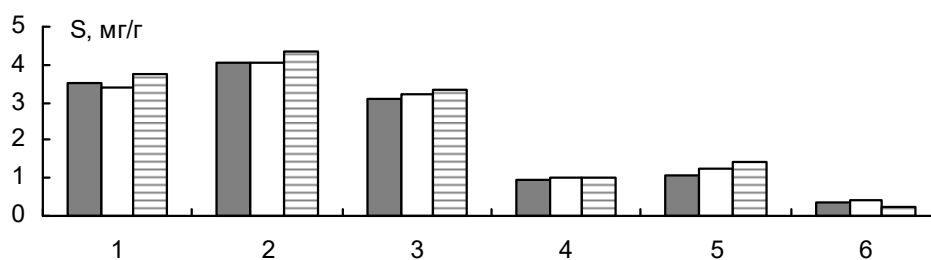


Рис. 2. Сорбционная емкость по отношению к ионам меди биомассы *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (▨) до и после обработки бензалкониум хлоридом (BAC): 1 – сырой нативный мицелий; 2 – сырой мицелий после 2,0%-го раствора BAC; 3 – сырой мицелий после 0,5%-го раствора BAC; 4 – сухой мицелий; 5 – сухой мицелий после 2,0%-го раствора BAC; 6 – сухой мицелий после 0,5%-го раствора BAC

Fig. 2. Sorption capacity with respect to copper ions of biomass *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (▨) before and after treatment with benzalkonium chloride (BAC): 1 – raw native mycelium; 2 – raw mycelium after 2.0 % BAC solution; 3 – raw mycelium after 0.5 % BAC solution; 4 – dry mycelium; 5 – dry mycelium after 2.0 % BAC solution; 6 – dry mycelium after 0.5 % BAC solution

Высушивание биомассы снизило ее сорбирующую способность очень значительно. Сорбционная емкость по иону меди мицелия *A. versicolor*, *A. ochraceus*, *A. niger*, высушенного после 1-часового воздействия 0,5%-м раствором бензалкониум хлорида, уменьшилась по сравнению с нативной биомассой в 11,7, 8,5 и 12,3 раза соответственно (см. рис. 2).

Способность биомассы грибов связывать ионы металлов широко варьирует между различными грибами и для различных металлов. Если *A. versicolor* сорбировал ионы меди лучше, чем другие грибы, то по отношению к ионам цинка наибольшая сорбционная емкость выявлена у *A. ochraceus*, однако закономерности воздействия биоцидной обработки и высушивания были аналогичными (рис. 3).

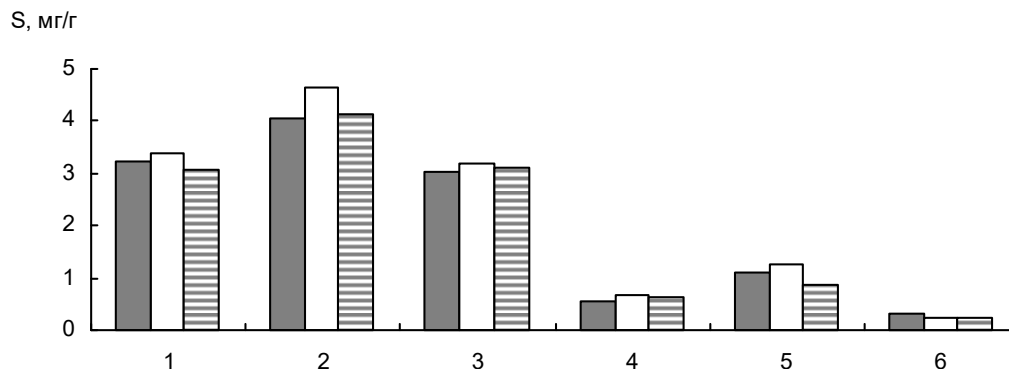


Рис. 3. Сорбционная емкость по отношению к ионам цинка биомассы *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (▨) до и после обработки бензалкониум хлоридом (BAC): 1 – сырой нативный мицелий; 2 – сырой мицелий после 2,0%-го раствора BAC; 3 – сырой мицелий после 0,5%-го раствора BAC; 4 – сухой мицелий; 5 – сухой мицелий после 2,0%-го раствора BAC; 6 – сухой мицелий после 0,5%-го раствора BAC

Fig. 3. Sorption capacity with respect to zinc ions of biomass *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (▨) before and after treatment with benzalkonium chloride (BAC): 1 – raw native mycelium; 2 – raw mycelium after 2.0 % BAC solution; 3 – raw mycelium after 0.5 % BAC solution; 4 – dry mycelium; 5 – dry mycelium after 2.0 % BAC solution; 6 – dry mycelium after 0.5 % BAC solution

Сорбционные процессы зависят не только от химического состава грибной клеточной стенки, но и от плотности упаковки макромолекул, соотношения кристаллических и аморфных областей. Кристаллические области практически недоступны для ионов металлов. Структурные биополимеры клеточной стенки не только химически связывают ионы металлов, но и улавливают их в межфибриллярные капилляры. Обработка биомассы, дезорганизуя биополимеры клеточной стенки с нару-

шением химических связей, в первую очередь водородных, может освободить функциональные группы и сделать их реакционноспособными. Вероятно, аналогичный процесс является причиной того, что «убитая» биомасса, сорбирует ионы меди и цинка лучше, чем нативный мицелий [17].

Сорбционная способность мицелия по отношению к ионам свинца после биоцидной обработки изменилась незначительно, а после высушивания значительно снизилась (рис. 4).

Так как в поглощении ионов свинца большую роль играет не только химическое связывание, но физическая сорбция, можно предположить, что при высушивании происходят существенные изменения капиллярно-пористой структуры клеточной стенки грибов.

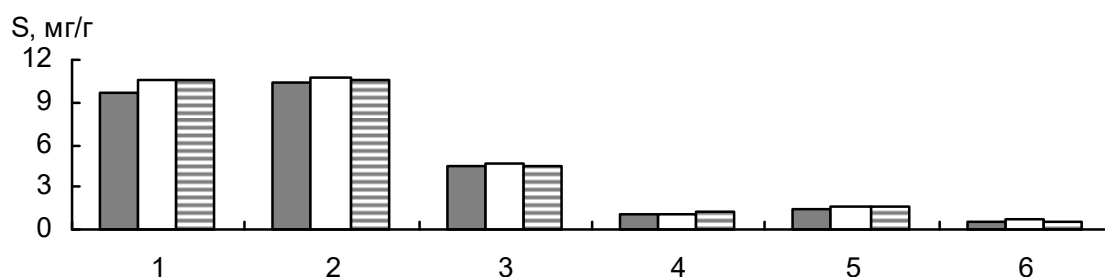


Рис. 4. Сорбционная емкость по отношению к ионам свинца биомассы *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (▨) до и после обработки бензалкониум хлоридом (BAC): 1 – сырой нативный мицелий; 2 – сырой мицелий после 2,0%-го раствора BAC; 3 – сырой мицелий после 0,5%-го раствора BAC; 4 – сухой мицелий; 5 – сухой мицелий после 2,0%-го раствора BAC; 6 – сухой мицелий после 0,5%-го раствора BAC

Fig. 4. Sorption capacity with respect to lead ions of biomass *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (▨) before and after treatment with benzalkonium chloride (BAC): 1 – raw native mycelium; 2 – raw mycelium after 2.0 % BAC solution; 3 – raw mycelium after 0.5 % BAC solution; 4 – dry mycelium; 5 – dry mycelium after 2.0 % BAC solution; 6 – dry mycelium after 0.5 % BAC solution

В процессе ионного обмена биосорбентам присуща избирательность, заключающаяся в том, что сорбирующая способность зависит не только от числа функциональных групп, способных вступать во взаимодействие с ионами металлов, но и от свойств самих катионов. Важной характеристикой селективности сорбции металлов является объемный коэффициент распределения K_d , показывающий отношение концентрации сорбируемого вещества в сорбенте к его концентрации в растворе в состоянии равновесия. Из разбавленных растворов солей тяжелых металлов (концентрация 10 мг/л) мицелий *A. niger* извлекал в первую очередь ионы свинца, при этом после обработки 2%-м BAC K_d повысился с 862 до 1497 мл/г. Предпочтительность сорбции свинца сохранилась и после высушивания мицелия, но на достаточно низком уровне (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты распределения в системах мицелий *A. niger* – ионы тяжелых металлов, мл/г

Table 2. Distribution coefficients in systems: *A. niger* mycelium – heavy metal ions, ml/g

Обработка	K_d сырого мицелия			K_d сухого мицелия		
	Cu^{2+}	Zn^{2+}	Pb^{2+}	Cu^{2+}	Zn^{2+}	Pb^{2+}
Без обработки	516	480	862	68	36	84
2,0%-й раствор BAC	724	631	1497	85	45	106
0,5%-й раствор BAC	340	284	729	35	22	68

Клеточная стенка грибов проявляет высокое сродство к ионам тяжелых металлов, катионы калия, натрия, кальция и магния (5 мг/л), не оказывают существенного влияния на извлечение ионов тяжелых металлов из разбавленных растворов биомассой изученных грибов. У целлюлозных сорбентов, к которым относят и отходы целлюлозно-бумажной промышленности, сорбция ионов тяжелых металлов протекает по конкурентному механизму. В присутствии NaCl происходит довольно значительное уменьшение коэффициента распределения в системе целлюлозный сорбент – ионы тяжелых металлов, т. е. наблюдается процесс десорбции катионов металлов с сорбента ионами натрия. Ионы Na^+ занимают сорбционные центры сорбента и вытесняют с них ионы тяжелых металлов в раствор [18].

Заключение. В решении проблем загрязнения окружающей среды существенное внимание уделяется расширению масштабов использования упаковки из биоразлагаемых материалов и ее рециклингу. Следует учитывать, что бумажная и картонная упаковка легко подвержены колонизации плесневыми грибами. Основным способом борьбы с плесневением в настоящее время является использование биоцидов, что также может иметь негативные экологические последствия. Пораженные целлюлозные материалы после антисептической обработки могут приобрести нежелательные свойства, в числе которых усиление аккумуляции ионов тяжелых металлов. Минимизировать негативные последствия использования пораженного картона для вторичной переработки позволяет механическая очистка от грибных спор в сочетании с высушиванием мицелия до потери его жизнеспособности. Все этапы борьбы с плесневым поражением картонных коробок от выявления очагов до оценки эффективности их деконтаминации перед сдачей в макулатуру должны проводиться в сочетании с микологическим контролем.

Список использованных источников

1. Дьякова, Е. В. Переработка макулатуры : учеб. пособие / Е. В. Дьякова, Д. А. Дулькин, В. И. Комаров // Архангельск : Изд-во АГТУ, 2009. – 172 с.
2. Технология и оборудование переработки макулатуры : учеб. пособие / М. В. Ванчаков [и др.]. – СПб., 2019. – Ч. I. – 107 с.
3. ГОСТ 10700–1997. Макулатура бумажная и картонная. Технические условия. Межгосударственный стандарт. – Минск, 2002. – 12 с.
4. Duran, A. Evaluation of metal concentration in food packaging materials. Relation to human health / A. Duran, M. Tuzen, M. Soylak // Atomic spectroscopy. – 2013. – Vol. 34, № 2–3. – P. 99–103.
5. Mertoglu-Elmas, G. Toxic Metals in Paper and Paperboard Food Packagings BioResources / G. Mertoglu-Elmas // BioResources. – 2017. – Vol. 13, № 4. – P. 7560–7580.
6. Heavy metal contaminants removal from wastewater using the potential filamentous fungi biomass : a review / S. Siddiquee [et al.] // J. Microb. Biochem. Technol. – 2015. – Vol. 7, № 6. – P. 384–393.
7. Сорбция тяжелых металлов плесневым грибом *Aspergillus carbonarius*, меланизирующим картон / А. Э. Томсон [и др.] // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 221–228.
8. Тригубович, А. М. Рост микромицетов, выделенных из очагов плесневого поражения архивохранилища, при пониженной температуре и влажности / А. М. Тригубович, И. А. Гончарова, А. А. Арашкова // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты : сб. науч. тр. – Минск : Беларуская навука, 2019. – Т. 11. – С. 189–199.
9. ГОСТ Р ИСО 21807-2012 Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Определение активности воды. – Введ. 01.07.2013. – М. : Стандартинформ, 2013. – 8 с.
10. Ребрикова, Н. Л. Экстремально ксерофильные грибы, обнаруженные в музейных фондах / Н. Л. Ребрикова, В. Б. Понизовская // Современная микология в России. – 2015. – Т. 4. – С. 298–300.
11. Марфенина, О. Е. Экологические условия развития потенциально патогенных мицелиальных грибов / О. Е. Марфенина, Г. М. Фомичева, А. Б. Кулько // Успехи медицинской микологии : материалы III Всерос. конгр. по мед. микологии, Москва, 24–25 марта, 2005 г. – Т. 5. – М. : Национальная академия микологии, 2005. – С. 74–77.
12. Брайкова, А. М. Миграция тяжелых металлов из одноразовых бумажных стаканчиков / А. М. Брайкова, С. К. Протасов, М. С. Мулёва // Изв. ТулГУ. – 2021. – № 3. – С. 3–13.
13. Матвейко, Н. П. Исследование миграции тяжелых металлов из школьных тетрадей / Н. П. Матвейко, А. М. Брайкова, Н. А. Циркунова // Вестн. ВГТУ. – 2019. – № 2 (37) – С. 89–96.
14. Матвейко, Н. П. Миграция тяжелых металлов из издательской продукции для детей / Н. П. Матвейко, А. М. Брайкова, В. В. Садовский // Вестн. ВГТУ. – 2018. – № 1 (34). – С. 88–95.
15. Аккумуляция тяжёлых металлов микробным сорбентом / А. Б. Таширев [и др.] // Микробиол. журн. – 1997. – Т. 59, № 3. – С. 70–79.
16. Горовой, Л. Ф. Клеточная стенка грибов – оптимальная структура для биосорбции / Л. Ф. Горовой, В. Н. Косяков // Биополимеры и клетка. – 1996. – Т. 12, № 4. – С. 49–60.
17. Феофилова, Е. П. Сорбция ионов свинца *Aspergillus niger*. Влияние предварительной обработки мицелия / Е. П. Феофилова, А. П. Марьин, В. М. Терешина // Прикл. биохим. и микробиол. – 1994. – Т. 30, № 1. – С. 149–155.
18. Никифорова, Т. Е. Особенности распределения катионов тяжелых металлов в гетерофазной системе водный раствор – целлюлозный сорбент / Т. Е. Никифорова [и др.] // Вестн. Казан. технолог. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 116–121.

References

1. Dyakova E. V., Dulkan D. A., Komarov V. I. *Pererabotka makulatury : ucheb. posobie* [Waste paper recycling: textbook. allowance]. Arkhangelsk, Publishing House of ASTU, 2009, 172 p. (in Russian)
2. Vanchakov M. V., Kuleshov A. V., Aleksandrov A. V., Gause A. A. *Tekhnologiya i oborudovanie pererabotki makulatury : ucheb. posobie* [Technology and equipment for waste paper processing : a textbook]. SPb., 2019, part I, 107 p. (in Russian)
3. GOST 10700–1997. *Makulatura bumazhnaya i kartonnaya. Tekhnicheskie usloviya. Mezhgosudarstvennyj standart* [State Standard 10700–1997. Waste paper and cardboard. Specifications]. Minsk, 2002, 12 p. (in Russian)
4. Duran A., Tuzen M., Soylak M. Evaluation of metal concentration in food packaging materials. Relation to human health. *Atomic spectroscopy*, 2013, vol. 34, no. 3, pp. 99–103.
5. Mertoglu-Elmas G. Toxic Metals in Paper and Paperboard Food Packagings BioResurces. *BioResources*, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 7560–7580.
6. Siddiquee S., Rovina K., Al Azad S., Naher L., Suryani S., Chaikaew P. Heavy metal contaminants removal from wastewater using the potential filamentous fungi biomass: a review. *J. Microb. Biochem. Technol*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 384–393.
7. Thomson A. E., Goncharova I. A., Trigubovich A. M., Sokolova T. V., Sosnovskaya N. E., Navosha Yu. Yu., Pekhtereva V. S. *Sorbciya tyazhelykh metallov plesnevym gribom Aspergillus carbonarius, melaniziruyushchim karton* [Sorption of heavy metals by the mold *Aspergillus carbonarius*, melanizing cardboard]. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 221–228. (in Russian)
8. Trigubovich A. M., Goncharova I. A., Arashkova A. A. *Rost mikromicetov, vydelennykh iz ochagov plesneвого porazheniya arkhivokhranilishcha, pri ponizhennoj temperature i vlazhnosti* [Growth of micromycetes isolated from foci of mold damage in the archives at low temperature and humidity]. *Mikrobnnye biotekhnologii: fundamental'nye i prikladnye aspekty* [Proc. Microbial biotechnologies: fundamental and applied aspects]. Minsk, Belarusian Science Publ., 2019, vol. 11, pp. 189–199. (in Russian)
9. GOST R ISO 21807-2012 *Mikrobiologiya pishchevykh produktov i kormov dlya zhivotnykh. Opredelenie aktivnosti vody*. [State Standard R ISO 21807-2012. Microbiology of food and animal feed. Determination of water activity]. Introduction 07/01/2013. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 8 p. (in Russian)
10. Rebrikova N. L., Ponizovskaya V. B. *Ehkstremal'no kserofil'nye griby, obnaruzhennyye v muzejnykh fondakh* [Extremely xerophilic fungi found in museum collections]. *Modern Mycology in Russia*, 2015, vol. 4, pp. 298–300. (in Russian)
11. Marfenina O. E., Fomicheva G. M., Kulko A. B. *Ehkologicheskie usloviya razvitiya potencial'no patogennykh micelial'nykh gribov* [Ecological conditions for the development of potentially pathogenic filamentous fungi]. *Uspekhi medicinskoj mikologii: materialy III Vserossijskogo kongressa po medicinskoj mikologii* [Proc. III All-Russian Congress "Progress in medical mycology"]. Moscow, 24–25 March, 2005, vol. 5. Moscow, National Academy of Mycology Publ., 2005, pp. 74–77. (in Russian)
12. Braikova A. M., Protasov S. K., Muleva M. S. *Migraciya tyazhelykh metallov iz odnorazovykh bumazhnykh stakanchikov* [Migration of heavy metals from disposable paper cups]. *News of TuSU*, 2021, no. 3, pp. 3–13. (in Russian)
13. Matveiko N. P., Braikova A. M., Tsirkunova N. A. *Issledovanie migracii tyazhelykh metallov iz shkol'nykh tetradej* [Study of the migration of heavy metals from school notebooks]. *Bulletin of VSTU*, 2019, no. 2 (37), pp. 89–96. (in Russian)
14. Matveiko N. P., Braikova A. M., Sadovsky V. V. [Migration of heavy metals from publishing products for children]. *Bulletin of VSTU*, 2018, no. 1 (34), pp. 88–95. (in Russian)
15. Tashirev A. B., Smirnova G. F., Yanover S. B., Samchuk A. P. *Akkumulyaciya tyazhyolykh metallov mikrobnym sorbentom* [Accumulation of heavy metals by microbial sorbent]. *Microbiol. well.*, 1997, vol. 59, no. 3, pp. 70–79. (in Russian)
16. Gorovoy L. F., Kosyakov V. N. *Kletochnaya stenka gribov – optimal'naya struktura dlya biosorbicii* [The cell wall of fungi – the optimal structure for biosorption]. *Biopolymers and cells*, 1996, vol. 12, no. 4, pp. 49–60. (in Russian)
17. Feofilova E. P., Maryin A. P., Tereshina V. M. *Sorbciya ionov svinca Aspergillus niger. Vliyanie predvaritel'noj obrabotki miceliya* [Sorption of lead ions by *Aspergillus niger*. Influence of pretreatment of mycelium]. *Applied biochem. and microbiol.*, 1994, vol. 30, no. 1, pp. 149–155. (in Russian)
18. Nikiforova T. E., Kozlov V. A., Modina E. A., Rodionova M. V., Gagina A. N. *Osobennosti raspredeleniya kationov tyazhelykh metallov v geterofaznoj sisteme vodnyj rastvor – cellyuloznyj sorbent* [Features of the distribution of heavy metal cations in a heterophase system aqueous solution – cellulose sorbent]. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2010, no. 2, pp. 116–121. (in Russian)

Информация об авторах

Томсон Алексей Эммануилович – кандидат химических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий Центром по торфу и сапропелям, заведующий лабораторией экотехнологий, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: altom@nature-nas.by

Соколова Тамара Владимировна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tomsok49@tut.by

Гончарова Инесса Адамовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Белорусский научно-исследовательский институт документоведения и архивного дела (ул. Кропоткина, 55, 220002, г. Минск, Беларусь). E-mail: gontcharova.mould@gmail.com

Арашкова Алина Александровна – научный сотрудник, Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, г. Минск, Беларусь). E-mail: sorbis@mbio.basnet.by

Сосновская Наталия Евгеньевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: natalisosnov@mail.ru

Пехтерева Виктория Станиславовна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: pehvik@yandex.ru

Information about the authors

Alexey E. Tomson – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Deputy Director, Head of the Center of Peat and Sapropel, Head of Lab. of Ecotechnology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: altom@nature-nas.by

Tamara V. Sokolova – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tomsok49@tut.by

Inessa A. Gontcharova – Ph. D. (Biology), Leading Researcher, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (55, F. Kropotkina Str., 220002, Minsk, Belarus). E-mail: gontcharova.mould@gmail.com

Alina A. Arashkova – Researcher, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str. 220141, Minsk, Belarus). E-mail: sorbis@mbio.basnet.by

Nataliya E. Sosnovskaya – 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: natalisosnov@mail.ru

Victoriya S. Pehtereva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: pehvik@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТОРФЯНЫХ АКТИВИРОВАННЫХ УГЛЕЙ

А. Э. Томсон, А. С. Марзан, Т. Я. Царюк, И. П. Фалюшина,
Т. В. Соколова, М. Г. Калантаров, В. С. Пехтерева

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В Институте природопользования НАН Беларуси проведены широкие исследования по получению активированных углей различного назначения из торфа, которые показали, что для получения качественных углей необходимо использовать верховой торф высокой степени разложения. С целью расширения сырьевой базы представляло интерес исследовать возможность получения углей из торфа более низкой степени разложения.

Получены образцы торфа, модифицированные побочными и остаточными продуктами переработки нефти и древесными опилками лиственных пород в гранулированном виде. Проведена оценка физико-технических и сорбционных свойств полученных гранул. Также методом термического анализа были изучены композиции торфа с углеводородными присадками.

Получены активированные угли на основе композиций торфа, древесных опилок и некоторых углеводородных отходов нефтехимического синтеза и изучены их сорбционные и прочностные свойства. Установлено, что использование углеводородных модификаторов позволяет повысить адсорбционную активность углей на 20–50 %. Введение в торф древесных опилок также увеличивает адсорбционную активность на 13–55 % в зависимости от количества введенной добавки, прочностные свойства и насыпная плотность при этом уменьшаются по сравнению с торфяным активированным углем.

Ключевые слова: торф; продукты переработки нефти; древесные опилки; торфяной активированный уголь; прочность; сорбционные свойства.

Для цитирования. Томсон А. Э., Марзан А. С., Царюк Т. Я., Фалюшина И. П., Соколова Т. В., Калантаров М. Г., Пехтерева В. С. Влияние органических модифицирующих добавок на качественные показатели торфяных активированных углей // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 166–175.

INFLUENCE OF ORGANIC MODIFYING ADDITIVES ON QUALITATIVE INDICATORS OF PEAT ACTIVATED COAL

A. E. Tomson, A. S. Marzan, T. Ya. Tsariuk, I. P. Faliushyna,
T. V. Sokolova, M. G. Kalantarov, V. S. Pehtereva

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

Abstract. The Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus conducted extensive research on the production of activated carbons for various purposes from peat, which showed that in order to obtain high-quality coals, it is necessary to use high-moor peat of a high degree of decomposition. In order to expand the resource base, it was of interest to explore the possibility of obtaining coal from peat with a lower degree of decomposition.

Peat samples modified by products and residual products of oil refining and hardwood sawdust in granular form were obtained. An assessment of the physico-technical and sorption properties of the obtained granules was carried out. The compositions of peat with hydrocarbon additives were also studied by thermal analysis.

Activated carbons based on compositions of peat, sawdust and some hydrocarbon wastes of petrochemical synthesis have been obtained, and their sorption and strength properties have been studied. It has been established that the use of hydrocarbon modifiers makes it possible to increase the adsorption activity of coals by 20–50 %. The introduction of sawdust into peat also increases the adsorption activity by 13–55 %, depending on the amount of additive introduced, while the strength properties and bulk density decrease in comparison with peat activated carbon.

Keywords: peat; sawdust; oil refinery products; peat activated carbon; strength; sorption properties.

For citation. Tomson A. E., Marzan A. S., Tsariuk T. Ya., Faliushyna I. P., Sokolova T. V., Kalantarov M. G., Pehtereva V. S. Influence of organic modifying additives on qualitative indicators of peat activated coal. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 166–175.

Введение. Одним из приоритетных направлений в области глубокой переработки торфа является получение на его основе активированных углей (АУ) [1].

Активированный уголь – высокопористый углеродный адсорбент, который получают из различных углеродсодержащих материалов органического происхождения [2, 3].

В настоящее время активированный уголь используется во многих процессах химической технологии – для очистки, разделения и извлечения различных веществ, как жидких, так и газообразных. Особенно хорошо АУ адсорбируют углеводороды и их производные, слабее – спирт, аммиак и другие полярные вещества.

С каждым годом потребление этого продукта неуклонно возрастает, в связи с этим есть необходимость в расширении его ассортимента. Увеличение объемов производства углей и расширение их номенклатуры приводят к тому, что возрастают требования к адсорбционной емкости с разнообразной пористой структурой и к прочности АУ [4, 5].

По сравнению с другими адсорбционными материалами (силикагели, цеолиты, алюмогели, иониты и др.) АУ являются уникальными адсорбентами в силу своих гидрофобных свойств. Преимуществами АУ перед другими сорбентами являются биологическая, химическая и термическая стойкость, что позволяет многократно их использовать в цикле «адсорбция – регенерация», а также гидрофобность поверхности. Именно благодаря гидрофобности поверхность АУ способна сорбировать из водных растворов или влажных газовых сред органические примеси – ароматические углеводороды, фенолы, диоксины, галогенпроизводные и др.

В связи с этим возникает необходимость изыскания различных способов получения АУ с широким спектром различных свойств.

В настоящее время в Республике Беларусь АУ не производятся.

В Институте природопользования НАН Беларуси проведены многочисленные исследования по получению АУ различного назначения из торфа. Установлено, что для получения качественных АУ необходимо использовать верховой торф высокой степени разложения (более 40 %), что подтверждено в ходе исследовательских работ по определению возможности получения АУ из торфяного сырья месторождения «Туршевка–Чертово» Крупского района Минской области. С целью расширения сырьевой базы для получения АУ представляло интерес исследовать возможность получения углей из торфа более низкой степени разложения.

Образование пористой структуры карбонизованных продуктов из торфа и других углеродсодержащих материалов зависит и от введения структурирующих добавок, в качестве которых используют природные (целлюлоза, лигнин сосновый, остаток от гидролиза торфа) и синтетические (фуриловая и фенолформальдегидная смолы) полимеры, каменноугольный пек, продукты переработки нефти [6]. Показано, что природные полимеры с высоким содержанием кислорода способствуют образованию в углеродных материалах при термообработке значительного объема макропор. Введение в композицию синтетических полимеров обеспечивает равномерную усадку по всему куску карбонизируемого продукта и формирование углеродного скелета с весьма однородной микропористой структурой. Известно, что с целью улучшения сорбционных характеристик и повышения прочности торфяных АУ опробован ряд модифицирующих добавок, являющихся сегодня крупнотоннажными отходами химических производств [7]. Установлено, что их использование способствует развитию в карбонизованном материале мезо- и микропор, увеличению прочности АУ на 9–13 %.

С учетом дешевизны торфяного сырья, а также разнообразия составляющих его компонентов по составу, цель работы – исследовать возможности получения из торфяного сырья низкой степени разложения АУ, содержащих модифицирующие добавки различной природы, обладающие направленным влиянием на выход, прочностные характеристики и параметры пористой структуры АУ.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования являются верховой торф низкой степени разложения (20–25 %) месторождения «Радемье», активированный уголь на основе исходного гранулированного торфа и модифицированного добавками органической природы.

Наиболее перспективными для использования в качестве модифицирующих добавок являются остаточные продукты переработки нефти: тяжелая пиролизная смола (ТПС), мазут М-100 и пластификатор нефтяной ПН-6, содержащие значительное количество полиароматических соединений и смол.

В качестве модифицирующих углеводородсодержащих добавок использован ряд отходов современного нефтехимического синтеза.

ОАО «Нафтан» в качестве товарного продукта выпускает мазут топочный М-100, который содержит 85–95 % углеводородов, в том числе не более 14 % парафино-нафтенных и 70–80 % ароматических углеводородов, а также до 8 % смол и до 7 % асфальтенов.

Масло-мягчитель (масло ПН-6) представляет собой концентрат ароматических углеводородов, получаемый компаудированием экстрактов фенольной очистки масляных фракций нефти. Оно содержит до 77 % ароматических углеводородов, при этом значительную долю составляют полиароматические углеводороды.

Одним из побочных продуктов синтеза олефинов на ПО «Полимир» является тяжелая смола пиролиза (ТСП), которая представляет собой остаток, выкипающий с температурой выше 180 °С и коксующестью как правило более 12 мас.%. Наличие в жидких продуктах пиролиза широкого спектра ароматических и алкилароматических углеводородов с ненасыщенными связями делает их ценным сырьем для нефтехимического синтеза.

Модифицирующие добавки на основе нефтепродуктов вводили в виде водных эмульсий из расчета 10 % добавки на сухое вещество торфа, при этом М-100 и ПН-6 вследствие их высокой вязкости предварительно нагревали до 80–100 °С. Также в качестве модифицирующих добавок были опробованы композиции этих компонентов с маловязкой тяжелой пиролизной смолой при соотношении 1 : 1, выполняющей наряду с основным назначением функцию разбавителя.

Древесные опилки добавляли в торф в количестве 10, 30, 50 % на сухое вещество, после чего в композит вводили требуемое количество воды.

Все образцы композитов тщательно перемешивали и выдерживали на воздухе в течение 20 ч. Гранулирование образцов торфа проводили на шнековом грануляторе с диаметром фильера 5 мм путем двукратной переработки. Полученные гранулы сушили в естественных условиях до влажности около 10 %.

Полученные образцы торфа с углеводородсодержащими добавками исследовали методом термического анализа. Термогравиметрический анализ композиций торфа с модифицирующими добавками проводили на синхронном термоанализаторе STA 2500 фирмы NETZSCH, работающим под управлением программного пакета NETZSCH Proteus Thermal Analysis.

Условия проведения исследований: термопара – тип S, тигель – Pt, эталон – Al_2O_3 , масса образца – 17–20 мг, скорость нагрева – 10 К/мин, диапазон температур – 30–1000 °С, газ-носитель, защитный газ – азот, расход газа-носителя – 20 мл/мин, расход защитного газа – 30 мл/мин. Каждый образец композиции подвергали термическому анализу в трехкратной повторности, а расчет дифференциальных кривых и их последующую обработку проводили по средней кривой потери массы.

Образцы АУ получали по следующей технологии. Высушенные гранулы помещали в печь карбонизации и нагревали со скоростью подъема температуры 3–4 °С/мин до конечной температуры 600 °С. Активацию торфяного кокса проводили в электропечи марки СУОЛ в среде перегретого водяного пара при температуре 900 °С. Время активации подбирали таким образом, чтобы все образцы находились в пределах степени обгара 50–62 %.

Для оценки свойств исходных гранул, кокса и АУ использовали как стандартные методы, так и лабораторные методики.

Определение влажности и зольности торфа проводили по СТБ 2042-2010, влажности кокса и АУ – по ГОСТ 12597-67, а их зольности – по ГОСТ 12596-67.

Насыпную плотность определяли по ГОСТ Р 55959-2014 в рабочем состоянии (т. е. с имеющейся влагой) и в пересчете на сухое вещество. Прочность на истирание исходных гранул композитов и полученных из них АУ оценивали по ГОСТ 16188-70.

О параметрах пористой структуры объектов исследования судили по указанным ниже характеристикам, которые определяли методами:

- адсорбционную активность по метиленовому голубому, характеризующую наличие мезопор (2–50 нм), – по ГОСТ 4453-74 на фотоэлектрическом концентрационном калориметре КФК-2МП;
- адсорбционную активность по иоду, свидетельствующую о развитии системы микропор, – титрованием по ГОСТ 6217-74,
- суммарный объем пор по воде (размер пор 0,5–10⁴ нм) – по ГОСТ 17219-71.

Результаты и их обсуждение. С целью изучения влияния добавок органической природы на процесс термодеструкции торфа получены экспериментальные образцы торфа, модифицированного продуктами переработки нефти и древесными опилками в гранулированном виде. Характеристики полученных композитов приведены в табл. 1.

Как следует из данных табл. 1, модифицирующие добавки органической природы не влияют на зольность композитов. Также из данных этой таблицы видно, что добавки снижают значения насыпной плотности, что свидетельствует об образовании менее компактных структур, возможно, за счет гидрофобизации отдельных составляющих органического вещества.

Использование продуктов переработки нефти для модификации торфа незначительно снижает прочность гранул на истирание, исключение составляет лишь масло ПН-6. Следует отметить, что прочность гранул с индивидуальными добавками выше, чем при использовании композиций этих присадок. Введение древесных опилок существенно снижает прочность гранул на истирание.

Таблица 1. Физико-техническая характеристика композиций на основе торфа и органических добавок**Table 1. Physical and technical peculiarities of compositions based on peat and organic additives**

Количество добавки, %	Влажность гранул для коксования, %	Зольность, %	Насыпная плотность (на с. в.), г/дм ³	Прочность на истирание, %
0	11,5	1,7	299,1	76,6
<i>Продукты нефтепереработки</i>				
10 ТПС	12,0	1,7	274,1	74,4
10 М-100	8,7	1,8	272,5	70,9
10 ПН-6	8,9	1,8	261,0	83,2
5 ТПС + 5 М-100	9,8	1,9	251,6	67,2
5 ТПС + 5 ПН-6	10,1	1,9	248,3	70,2
<i>Древесные опилки</i>				
10	11,9	2,1	233,3	55,6
30	11,7	1,9	206,8	47,9
50	12,0	1,8	210,8	23,9

Для оценки влияния модифицирующих добавок на сорбционные и прочностные свойства термообработанных композиционных материалов были получены образцы коксов и АУ. Сорбционные характеристики кокса, полученного из гранулированного торфа, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сорбционные характеристики полученного торфяного кокса**Table 2. Sorption characteristics of the resulting peat coke**

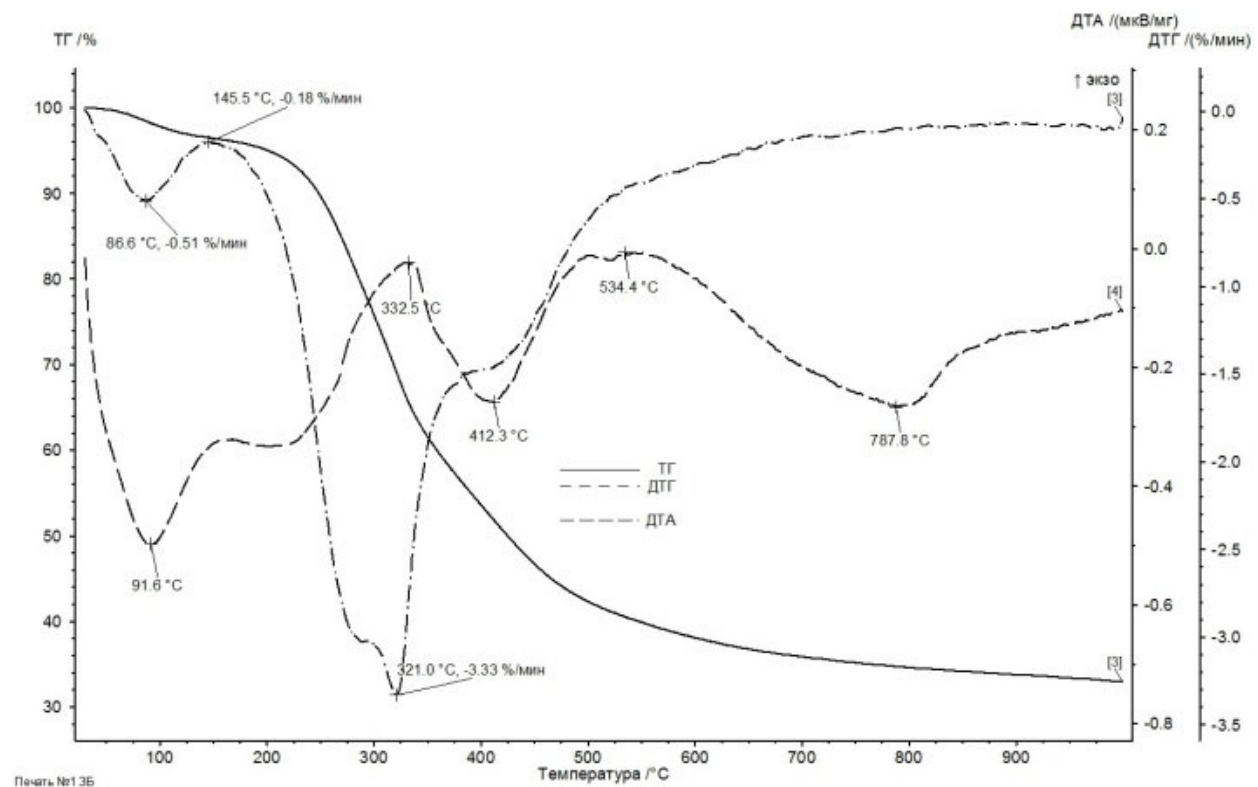
Концентрация добавки, %	Адсорбционная активность			Суммарный объем пор по воде, г/см ³
	Метиленовый голубой	Иод		
	мг/г	%	мг/г	
0	7,2	5,6	71,1	0,98
Продукты нефтепереработки				
10 ТПС	0,0	1,8	22,8	1,00
10 М-100	23,0	7,6	96,4	0,67
10 ПН-6	33,4	8,6	109,1	0,66
5 ТПС + 5 М-100	0,0	3,7	46,9	1,28
5 ТПС + 5 ПН-6	0,0	6,1	77,4	1,32
Древесные опилки				
10	22,0	8,2	104,1	1,51
30	0,0	6,3	79,9	1,56
50	12,3	15,0	190,4	1,88

У образцов торфа, модифицированного продуктами нефтепереработки, в результате коксования имеет место уменьшение суммарного объема пор по воде в 2–3 раза, что свидетельствует об уплотнении их структуры, и, как следствие, отсутствие открытой пористой структуры.

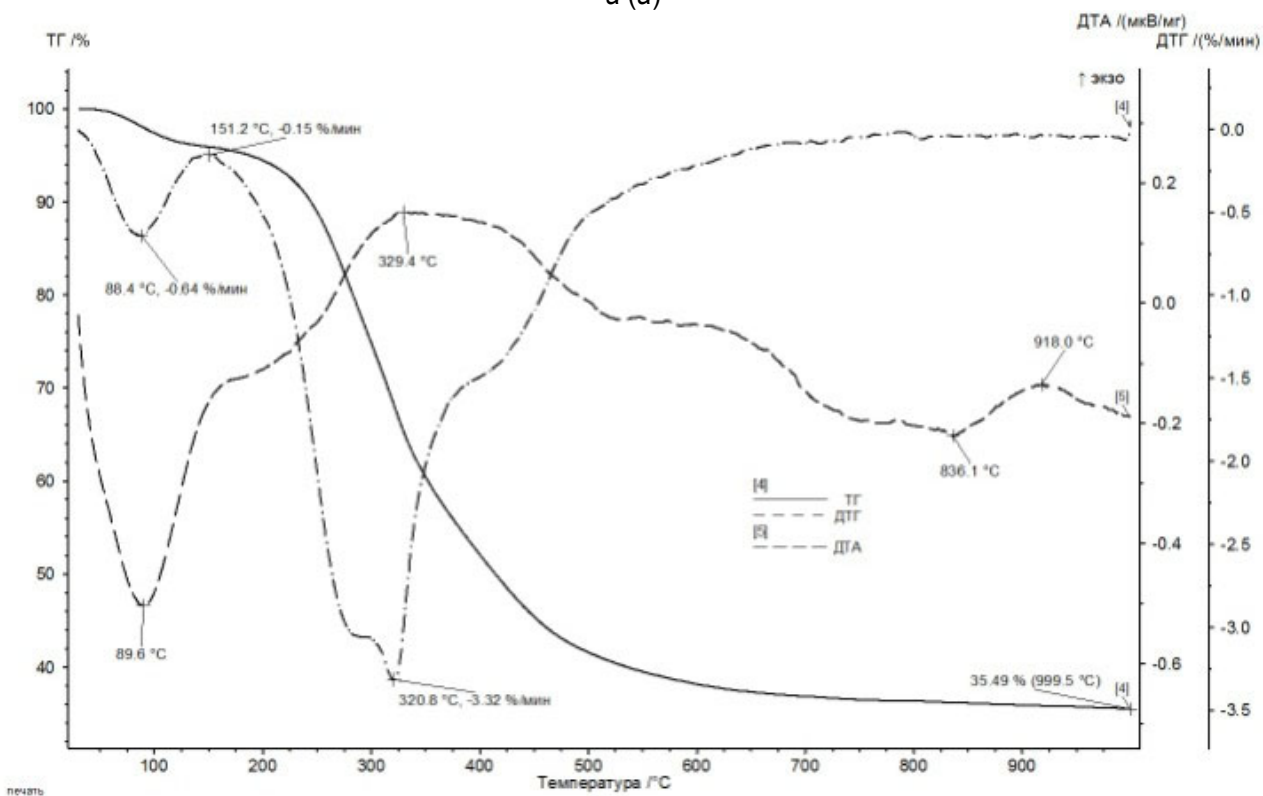
В результате оценки сорбционных свойств коксов установлено, что при карбонизации торфяного сырья происходит резкое снижение количества мезопор, а в ряде случаев их количество стремится к нулю. Например, при модификации торфа тяжелой пиролизной смолой и ее композициями с мазутом М-100 и маслом ПН-6 адсорбционная активность по метиленовому голубому отсутствует.

Как показано ранее (см. табл. 2), все исследованные образцы торфа, модифицированного органическими присадками, характеризуются незначительным количеством микропор. Адсорбционная активность по иоду коксов, полученных из образцов торфа, модифицированных продуктами нефтепереработки, практически не изменяется, а у коксов из торфа, модифицированного древесными опилками, несколько возрастает.

Методом термического анализа были изучены композиции торфа с углеводородными присадками. На рис. 1–2 приведены термограммы образцов исходного торфа, торфа с добавками тяжелой пиролизной смолы и нефтепродуктов.



а (а)



б (b)

Рис. 1. Термограммы образцов исходного (а) и модифицированного тяжелой пиролизной смолой (б) торфа

Fig. 1. Thermograms of samples of the original (a) and modified (b) peat with heavy pyrolysis resin

Картина процесса термической деструкции исходного торфа (см. рис. 1) достаточно характерна для термолиза большинства образцов торфа, вне зависимости от типовой и видовой их принадлежности. В температурном интервале 110–160 °С выделяется гигроскопическая и пирогенетическая вода. При температурах 275–325 °С термическое разложение сопровождается образованием значительного количества жидких продуктов пиролиза и процесс протекает с выделением тепла. В интервале температур 475–500 °С прекращается выделение жидких продуктов пиролиза, а выше 600 °С скорость деструктивных процессов существенно снижается. В температурном интервале 600–1000 °С процессы термического распада протекают без заметных тепловых эффектов.

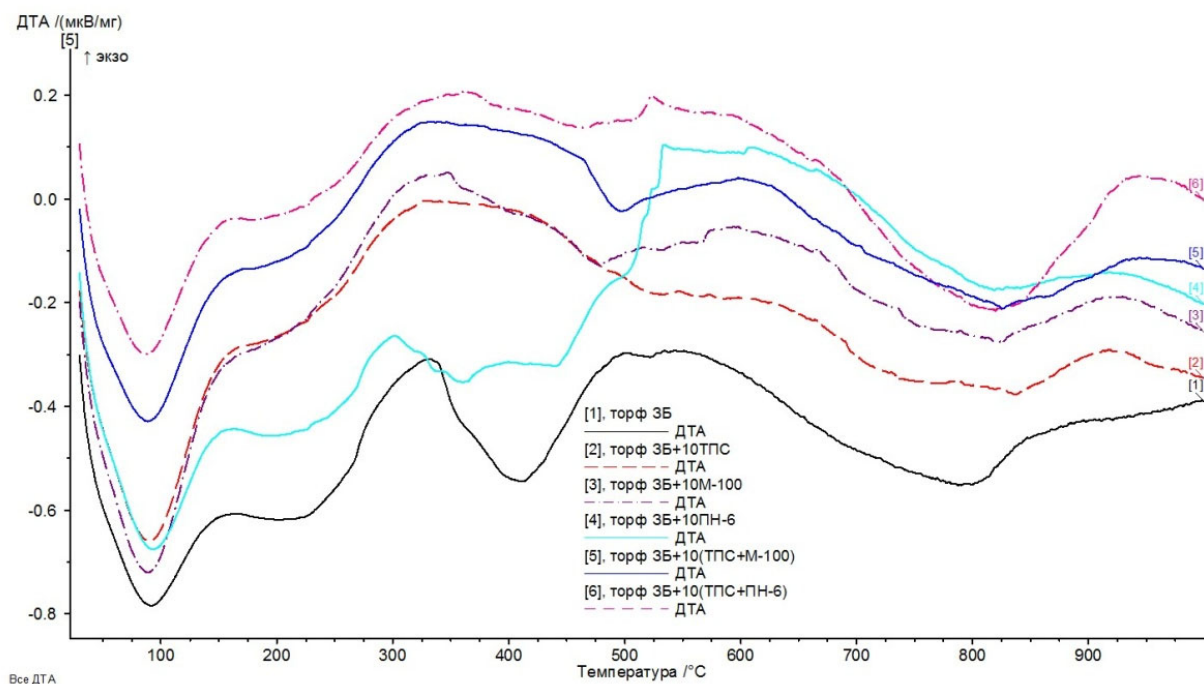


Рис. 2. Кривые ДТА образцов исходного и модифицированного нефтепродуктами торфа

Fig. 2. DTA curves for samples of original and modified peat with oil products

В табл. 3 приведены данные о потере массы образцами исходного торфа и торфа с углеводородными модификаторами. Как следует из представленных данных, потеря массы образцами торфа, модифицированного добавками ТПС, в интервале температур 150–600 °С практически идентичны с таковыми для исходного торфа, что свидетельствует о том, что добавки тяжелой пиролизной смолы не вышли из структуры композиционного материала при нагреве. Тогда как при термической деструкции композиций торфа с добавками М-100 и ПН-6 в области температур 150–600 °С потеря массы по сравнению с исходным торфом на 6–7 % выше, что свидетельствует об удалении части модифицирующих добавок за счет выгибания. Этот факт подтверждается появлением на термограммах торфа с добавками М-100 и ПН-6 эндотермических эффектов в области температур 450–500 °С. Процесс термического распада образцов торфа с добавками ТПС в области температур 600–900 °С протекает более медленно, чем исходного торфа. Это говорит об образовании более термоустойчивых структур в коксовом остатке. Несколько иная картина термического распада образцов торфа, модифицированного добавками М-100 и ПН-6, наблюдается в области температур 600–900 °С, для которой характерна несколько большая скорость протекания термодеструкции, сопровождаемая протеканием экзотермических процессов в области температур 800–1000 °С. Из общей теории строения углеродных материалов известно, что процессы, протекающие в высокотемпературных областях с экзотермическими эффектами, связаны с формированием более совершенных упорядоченных энергетически выгодных псевдографитных структур углерода. Эти результаты подтверждаются тем фактом, что из числа углеводородных модификаторов наиболее эффективными являются композиции торфа с присадками М-100 и ПН-6, повышающие прочность в 1,5 раза по сравнению с ТПС.

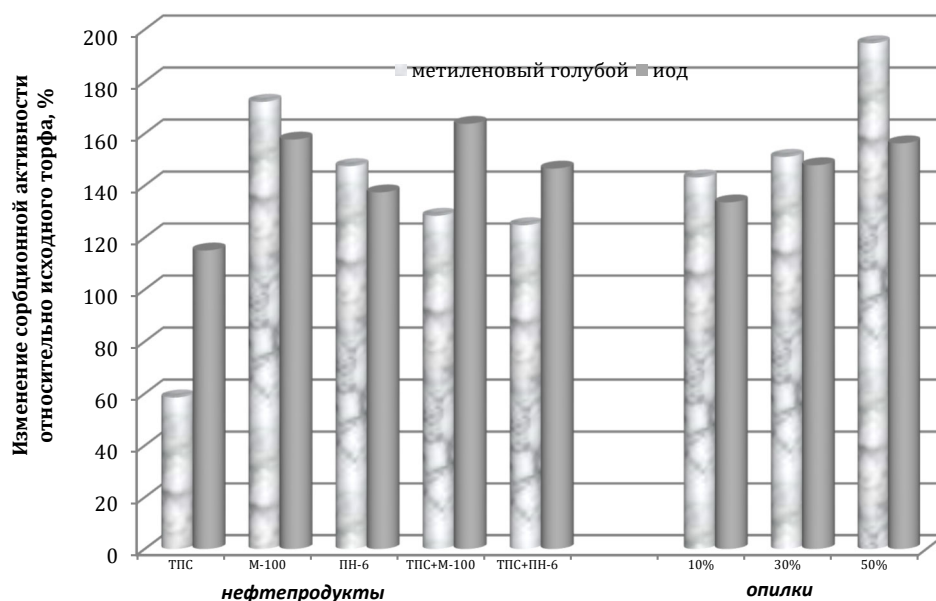
Таблица 3. Потеря массы образцов композиций торфа в различных температурных диапазонах**Table 3. Weight loss of samples of peat compositions in different temperature ranges**

Добавка	Содержание добавки, %	Потеря массы, %			Остаточная масса, %
		30–150 °С	150–600 °С	600–900 °С	
Торф без добавки	0	3,55	58,35	4,30	32,96
ТПС	10	4,10	57,72	2,23	35,49
М-100	10	4,55	65,04	5,21	24,26
ПН-6	10	4,16	64,30	5,04	25,58
ТПС + М-100	5+5	3,08	62,48	4,90	29,04
ТПС + ПН-6	5+5	2,73	62,02	6,14	28,72

В табл. 4 и на рис. 3–4 представлены сорбционные характеристики полученных модифицированных торфяных АУ.

Таблица 4. Характеристики полученного активированного угля из торфа**Table 4. Characteristics of the obtained activated carbon from peat**

Концентрация добавки, %	Адсорбционная активность			Прочность на истирание, %
	метиленовый голубой	иод		
		мг/г	мг/г	
0	148,3	54,6	693	31,2
Продукты нефтепереработки				
10 ТПС	86,8	62,8	798	0,1
10 М-100	180,0	74,2	942	7,2
10 ПН-6	218,7	75,0	953	23,3
5 ТПС + 5 М-100	190,4	89,4	1134	46,8
5 ТПС + 5 ПН-6	185,0	80,0	1015	50,9
Древесные опилки				
10	212,3	72,9	925	30,9
30	224,0	80,7	1024	2,1
50	288,8	85,3	1082	1,7

**Рис. 3. Влияние модифицирующих добавок на адсорбционную активность торфяных углей****Fig. 3. Influence of modifying additives on adsorption activity peat activated carbons**

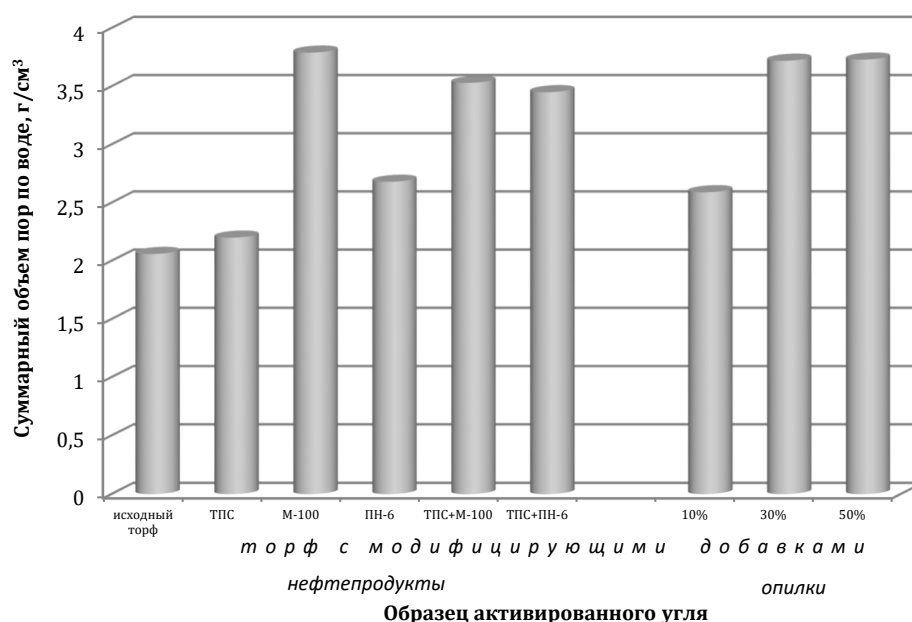


Рис. 4. Влияние модифицирующих добавок на суммарный объем пор по воде торфяных активированных углей

Fig. 4. The influence of the modifying additives on the total pore volume in water of peat activated carbons

Установлено, что введение в композицию древесных опилок способствует развитию пористой структуры торфяных АУ, при этом увеличивается количество как мезопор, так и микропор, о чем свидетельствует повышение их адсорбционной активности по сравнению с торфяным углем по метиленовому голубому в 1,4–1,9 раза и по иоду в 1,3–1,5 раза в зависимости от содержания опилок в композите.

Продукты переработки нефти влияют на пористую структуру АУ различным образом. Введение тяжелой пиролизной смолы приводит к снижению адсорбционной активности углей по метиленовому голубому на 40 %, что свидетельствует об уменьшении количества мезопор, при этом количество микропор возрастает на 15 %. Мазут М-100 и масло ПН-6 и композиции этих компонентов с тяжелой пиролизной смолой способствуют образованию как мезо-, так и микропор – адсорбционная активность возрастает в 1,2–1,5 раза.

На рис. 4 показано влияние модифицирующих добавок на суммарный объем пор по воде торфяных АУ. Наиболее заметные трансформации пористой структуры происходят при использовании в качестве модификатора мазута М-100 и композиций тяжелой пиролизной смолой с мазутом М-100 и маслом ПН-6. В процессе активации карбонизированного сырья суммарный объем пор полученных углей по сравнению с объемом пор кокса возрастает в 3,9–5,5 раза. С повышением содержания древесных опилок в композите суммарный объем пор АУ по воде также увеличивается на 30–85 %.

Все исследованные АУ характеризуются невысокой прочностью на истирание. Из числа продуктов нефтепереработки наиболее эффективными являются композиции тяжелой пиролизной смолы с М-100 и ПН-6, повышающие прочность в 1,5 раза. Следует отметить, что тяжелая пиролизная смола негативно влияет на прочность АУ, которая практически равна нулю. Введение в композицию более 10 % древесных опилок приводит к падению прочности АУ в 15 раз.

Закключение. Изучены физико-технические и сорбционные свойства полученных гранулированных композитов. Установлено, что введение продуктов нефтепереработки практически не влияет на суммарный объем пор по воде, но снижает адсорбционную активность торфяных композитов по метиленовому голубому примерно в 2 раза. Древесные опилки во всех исследованных концентрациях не оказывают существенного влияния на пористую структуру композитов.

У образцов торфа, модифицированного продуктами нефтепереработки, в результате коксования имеет место уменьшение суммарного объема пор по воде в 2–3 раза, что свидетельствует об уплотнении их структуры. Для композитов с древесными опилками данное явление не столь выражено.

Установлено, что все исследованные АУ характеризуются невысокой прочностью на истирание.

Оценка сорбционных свойств полученных АУ показала, что введение в композицию древесных опилок способствует развитию пористой структуры торфяных АУ, при этом увеличивается количество

как мезопор, так и микропор, о чем свидетельствует повышение их адсорбционной активности по сравнению с торфяным углем по метиленовому голубому в 1,4–1,9 раза и иоду в 1,3–1,5 раза в зависимости от содержания опилок в композите. Суммарный объем пор АУ по воде также увеличивается на 30–85 % с повышением содержания древесных опилок в композите.

Продукты переработки нефти влияют на пористую структуру АУ различным образом, а наиболее эффективными модифицирующими добавками являются мазут М-100 и масло ПН-6, которые способствуют образованию как мезо-, так и микропор: адсорбционная активность возрастает в 1,2–1,5 раза.

Список использованных источников

1. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова. – Минск : Беларуская навука, 2009. – С. 56–64.
2. Кропотов, В. И. Развивать производство активных углей в лесохимической промышленности / В. И. Кропотов // Гидролизная и лесохимическая промышленность. – 1976. – № 1. – С. 31–32.
3. Галкин, В. А. Исследования углей различных пород древесины как сырья для получения активных углей / В. А. Галкин, В. Н. Голубев, Ю. В. Андреев // Гидролизная и лесохимическая промышленность. – 1970. – № 4. – С. 18–19.
4. Jurgen, G. Die Einsatzgebiete von torfaktivkohle / G. Jurgen // Telma. – 1990. – Vol. 20. – P. 157–164.
5. Олонцев, В. Д. Активированные угли в народном хозяйстве страны / В. Д. Олонцев, О. В. Мамонов // Углеродные адсорбенты и их применение в промышленности : тез. докл. V Всесоюз. совещ., Пермь, 1991. – С. 3–4.
6. Дрожалина, Н. Д. Влияние модифицирующих добавок на пористую структуру углеродных адсорбентов из торфа / Н. Д. Дрожалина, Н. А. Булгакова, В. К. Жуков // Вес. Акад. наук БССР. Сер. хим. наук. – 1987. – № 6. – С. 98–101.
7. Нистратов, А. В. Оптимизация пористой структуры и прочности углеродных адсорбентов на основе торфа и полимерных отходов / А. В. Нистратов, В. Н. Клушин, В. М. Самодуров // Успехи в химии и химической технологии. – 2011. – № 10. – С. 11–15.

References

1. Tomson A. E., Naumova G. V. *Torf i produkty ego pererabotki* [Peat and derived products]. Minsk, 2009, pp. 56–64. (in Russian)
2. Kropotov V. I. *Razvivat proizvodstvo aktivnykh uglei v lesokhimicheskoi promyshlennosti* [To develop the production of active carbons in the wood chemical industry]. *Gidroliznaia i lesokhimicheskaja promyshlennost = Hydrolysis and Forestry Chemistry*, 1976, no. 1, pp. 31–32. (in Russian)
3. Galkin V. A., Golubev V. N., Andreev U. V. *Issledovaniia uglei razlichnykh porod drevesiny, kak syria dlia polucheniia aktivnykh uglei* [Studies of coals of various wood species as raw materials for the production of active carbons]. *Gidroliznaia i lesokhimicheskaja promyshlennost = Hydrolysis and Forestry Chemistry*, 1970, no. 4, pp. 18–19. (in Russian)
4. Jurgen G. Die Einsatzgebiete von torfaktivkohle. *Telma*, 1990, vol. 20, pp. 157–164.
5. Olontsev V. D., Mamonov O. V. *Aktivirovannye ugli v narodnom khoziaistve strany* [Activated carbons in the national economy of the country]. *Uglerodnye adsorbenty i ikh primenenie v promyshlennosti. Tezisy dokladov V Vsesoiuznogo soveshaniya* [Proc. of Vth All-Union Conf. 'Carbon adsorbents and their industrial applications']. Per'm, 1991, pp. 3–4. (in Russian)
6. Drozhalina N. D., Bulgakova N. A., Zhukov V. K. *Vliyanie modifiziruyushchih dobavok na poristuyu strukturu uglerodnykh adsorbentov iz torfa* [Influence of modifying additives on the porous structure of carbon adsorbents from peat]. *Bulletin of the Academy of Sciences of the BSSR. Chemical sci. series*, 1987, no. 6, pp. 98–101. (in Russian)
7. Nistratov A. V., Klushin V. N., Samodurov V. M. *Optimizaciya poristoj struktury i prochnosti uglerodnykh adsorbentov na osnove torfa i polimernykh othodov* [Optimization of the porous structure and strength of carbon adsorbents based on peat and polymeric waste]. *Uspekhi v himii i himicheskoi tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 2011, no. 10, pp. 11–15. (in Russian)

Информация об авторах

Томсон Алексей Эммануилович – кандидат химических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий Центром по торфу и сапропелям, заведующий лабораторией экотехнологий, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, д. 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: altom@nature-nas.by

Information about the authors

Alexey E. Tomson – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Deputy Director, Head of the Center of Peat and Sapropel, Head of Lab. of Ecotechnology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: altom@nature-nas.by

Марзан Анастасия Сергеевна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, д. 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: marr_29@mail.ru

Царюк Татьяна Яковлевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, д. 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tsariuk9@mail.ru

Фалюшина Ирина Петровна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, д. 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Соколова Тамара Владимировна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, д. 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tomsok49@tut.by

Калантаров Михаил Георгиевич – кандидат биологических наук, ведущий инженер, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, д. 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: mkalantaroff@gmail.com

Пехтерева Виктория Станиславовна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, д. 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: pehvik@yandex.ru

Anastasiya S. Marzan – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: marr_29@mail.ru

Tatiana Ya. Tsariuk – 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: tsariuk9@mail.ru

Iryna P. Faliushyna – 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

Tamara V. Sokolova – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tomsok49@tut.by

Michail G. Kalantarov – Ph. D. (Biology), Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: mkalantaroff@gmail.com

Victoriya S. Pehtereva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: pehvik@yandex.ru

Научное издание
Scientific publication

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
NATURE MANAGEMENT

№ 1, 2022

Редактор Н. Т. Гавриленко
Editor N. T. Gavrilenko

Компьютерная верстка Т. Н. Козловская
Computer page making T. N. Kozlovskaya

Переводчик П. Н. Анисенко
Translator P. N. Anisenko

Подписано в печать 28.08.2022.	<i>Signed into print 28.08.2022.</i>
Формат 60×90/8. Бумага офсетная.	<i>60×90/8 format. Office paper.</i>
Гарнитура Ариал. Печать цифровая.	<i>Arial garniture. Digital print.</i>
Усл. печ. л. 20,54.	<i>Conditional printed sheets 20.54.</i>
Уч.-изд. л. 19.	<i>Conditional edited sheets 19.</i>
Тираж 120 экз.	<i>Circulation 120 copies.</i>
Заказ № 786.	<i>Order No. 786.</i>

Полиграфическое исполнение	<i>Polygraph execution</i>
Государственное предприятие	<i>State Enterprise</i>
«СтройМедиаПроект».	<i>'StroiMediaProject'.</i>
Свидетельство о государственной	<i>The Certificate of state registration</i>
регистрации издателя,	<i>of the publisher, manufacturer,</i>
изготовителя, распространителя	<i>distributor of</i>
печатных изданий	<i>printed publications.</i>
№ 2/42 от 13.02.2014.	<i>No. 2/42 from 13.02.2014.</i>
Ул. В. Хоружей, 13/61, 220123, г. Минск	<i>13/61, V. Choruzhey Str., 220123, Minsk</i>