

ЧИСЛЕННАЯ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД МЕЖДУРЕЧЬЯ ВИЛИЯ – ГОЗОВКА (РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ)

В. Г. Жогло

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Создана численная геофiltрационная модель (ЧГФМ) подземных вод территории, ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка. В центре моделируемой области расположен ядерно-энергетический комплекс Белорусской АЭС (БелАЭС). На модели воспроизведены грунтовый (1-й от поверхности) водоносный горизонт, днепровский-сожский и березинский-днепровский водоно-ледниковые комплексы, водоносный бриневский терригенный горизонт и объединенный силурийский-девонский водоносный комплекс, разделяющие их слабопроницаемые слои, рельеф и речная сеть. ЧГФМ объекта реализована на базе программного обеспечения ModTech ЗАО «Геолинк» (г. Москва). На созданной модели выполнено моделирование фильтрации подземных вод в стационарной постановке. По результатам моделирования оценены естественные ресурсы подземных вод с их расчленением на подземный сток в реки и разгрузку грунтовых вод (ГВ) испарением; установлена структура водного баланса подземных и поверхностных вод; построены карты интенсивности инфильтрационного питания ГВ и интенсивности водообмена между днепровским-сожским водоно-ледниковым комплексом и грунтовым водоносным горизонтом. Созданная ЧГФМ является геофiltрационной основой для численного моделирования миграции подземных вод в районе БелАЭС.

Ключевые слова: Островец; подземные воды; геофiltрация; инфильтрационное питание; водный баланс; численное моделирование; коэффициент регуляризации.

Для цитирования. Жогло В. Г. Численная геофiltрационная модель подземных вод междуречья Вилия – Гозовка (Республика Беларусь) // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 113–125.

NUMERICAL GEOFILTRATION MODEL OF UNDERGROUND WATER OF THE VILIA – GOZOVKA INTERFLUVE (REPUBLIC OF BELARUS)

V. G. Zhoglo

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

Abstract. A numerical geofiltration model (NGFM) of underground water in the area bounded by the Vilia, Oshmyanka, Losha and Gozovka rivers has been developed. The nuclear power complex of the Belarusian Nuclear Power Plant (Belarusian NPP) is located in the centre of the modelled area. The model reproduces the groundwater, Dnieper-Sozh, Berezina-Dnieper, Brinevsky, and Silurian-Devonian aquifers, as well as their separating low-permeability layers, relief, and river network. The NGFM of the object is implemented based on ModTech software by Geolink (Moscow). The created model simulates the filtration of underground water in stationary setting. Based on the simulation results, natural water resources are evaluated with their breakdown into underground water runoff into rivers and groundwater discharge through evaporation. The structure of the water balance of underground and surface waters is established, and the maps of the intensity of groundwater infiltration feeding and water exchange between the Dnieper-Sozh and groundwater aquifers are constructed. The created NGFM serves as geofiltration basis for numerical modelling of groundwater migration in the area of Belarusian NPP.

Keywords: Ostrovets; underground water; geofiltration; infiltration feeding; water balance; numerical modelling; regularization coefficient.

For citation. Zhoglo V. G. Numerical geofiltration model of underground water of the Vilia – Gozovka interfluve (Republic of Belarus). *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 113–125.

Введение. Мировой опыт свидетельствует о том, что эксплуатация атомных электростанций (АЭС) оказывает негативное влияние на радиационное состояние подземных вод. В качестве одного из последних примеров является АЭС «Фукусима» в Японии, где радиоактивное загрязнение ГВ приобрело большие масштабы и рассматривается в качестве одного из серьезнейших последствий произошедшей аварии.

Случаи загрязнения подземных вод неоднократно фиксировались также на станциях, работавших в штатном режиме, в России, США и других странах. Согласно «Стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции», утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 02.06.2015 № 460, существует объективная необходимость создания пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) для обеспечения безопасной изоляции эксплуатационных радиоактивных отходов (РАО) Белорусской АЭС (БелАЭС) разных категорий. Строительство ПЗРО целесообразно осуществить с использованием приповерхностного способа локализации отходов [1].

Согласно оценкам ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси, на конкурирующих площадках для размещения ПЗРО БелАЭС зона аэрации не может исключить возможность поступления радионуклидов в ГВ в опасных концентрациях при отсутствии или разрушении инженерных барьеров. Расчеты показали, что уровня ГВ могут достичь 15 из 36 радионуклидов, рассмотренных в предварительном составе РАО. Причем наиболее опасными из них являются радионуклиды, слабо сорбируемые грунтами зоны аэрации и грунтового водоносного горизонта (^{3}H , ^{133}Ba , ^{14}C , ^{239}Pu , ^{36}Cl , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{234}U), т. е. имеют значения сорбционных характеристик в грунтах (K_d), близкие к нулю [2, 3].

Достигнув уровня ГВ, радионуклиды будут переноситься потоком подземных вод к областям их разгрузки (реки, озера, родники) и к источникам хозяйствственно-питьевого водоснабжения (водозаборы подземных вод, трубчатые колодцы в сельских населенных пунктах и дачных поселках). В связи с этим уже на стадии выбора мест размещения ПЗРО необходим долговременный прогноз миграции радионуклидов в подземных водах.

Геологические, инженерно-геологические и гидрогеологические данные по району строительства БелАЭС, полученные в предыдущие годы, в совокупности с результатами мониторинга подземных вод, проводившегося на стадии строительства, дают возможность создать детальные численные геофильтрационную и геомиграционную модели подземных вод территории размещения ПЗРО.

Цель работы – создать численную геофильтрационную модель (ЧГФМ) междуречья Вилия – Гозовка в качестве геофильтрационной основы численного моделирования потенциальной миграции радионуклидов на участке размещения ПЗРО. По результатам численного моделирования фильтрации грунтовых и межпластовых вод должны быть установлены пространственная структура геофильтрационного потока и интенсивность инфильтрационного водообмена, т. е. направления и скорости фильтрации подземных вод и межпластовые перетоки.

Материалы и методы исследования. Информационную основу ЧГФМ междуречья Вилия – Гозовка представляют материалы по геолого-гидрогеологическим условиям Островецкого региона, полученные в процессе научного сопровождения работ по обоснованию строительства БелАЭС. Их подробная характеристика дана в [4]. Базовые геолого-гидрогеологические материалы накапливались в процессе выполнения государственных геологических съемок, научно-исследовательских работ ГП «НПЦ по геологии», ГНУ «Институт природопользования НАН Беларусь» по проблемам неогеодинамики и региональной гидрогеологии Беларусь (А. К. Карабанов, А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич и др.), а также разработок по проблème «Подземные воды» к обоснованию воздействия БелАЭС на окружающую среду (А. В. Кудельский, Н. М. Томина, В. И. Пашкевич и др.). Специальные гидрогеологические исследования выполнены в 2008–2009 гг. РУП «Геосервис» (П. С. Лисовский, А. В. Петух, А. А. Чекан и др.), в результате которых была получена ценная информация по подземным водам пятикилометровой зоны БелАЭС.

ЧГФМ междуречья Вилия – Гозовка создана на базе лицензионного программного обеспечения (ПО) «ModTech» ЗАО «Геолинк Консалтинг» (вычислительная программа (ВП) GWFS, разработчик А. А. Рошаль, г. Москва). Система управления качеством разработки ПО «Геолинк» в 2002 г. сертифицирована на соответствие требованиям международного стандарта ISO 9001 : 2000. Программа GWFS (Ground Water Flow Simulation – моделирование фильтрации подземных вод) предназначена для решения гидрогеологических (геоэкологических) задач, связанных с анализом и прогнозом движения подземных вод. Она позволяет осуществлять моделирование стационарных и нестационарных задач геофильтрации в многослойных и квазитрехмерных изотропных и анизотропных в плане системах.

Фильтрация подземных вод в анизотропном проницаемом слое описывается в декартовой системе координат дифференциальным уравнением [5]:

$$\begin{aligned} \mu(x, y) \frac{\partial H}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[T_x(x, y) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T_y(x, y) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \\ & + A_B(x, y)(H - H_B) + A_H(x, y)(H - H_H) + q(x, y), \end{aligned} \quad (1)$$

где μ – коэффициент упругой (для напорного слоя) или гравитационной (для безнапорного слоя) водоотдачи (при переменном напорно-безнапорном режиме фильтрации коэффициент водоотдачи принимает соответствующее значение в зависимости от положения уровня по отношению к отметке кровли слоя); x и y – линейные координаты; H , H_b и H_n – абсолютные (или относительные) отметки уровней подземных вод расчетного, выше- и нижележащего проницаемых слоев соответственно; t – текущее время; T_x и T_y – проводимости проницаемого слоя вдоль осей X и Y соответственно (для изотропного слоя эти значения совпадают); A_b и A_n – коэффициенты перетока через выше- и нижележащий слабопроницаемые слои соответственно; $q(x, y)$ – интенсивность площадных и точечных источников (стоков).

В случае безнапорной фильтрации плановая проводимость однородного проницаемого слоя пропорциональна его мощности. При стационарной фильтрации левая часть уравнения (1) равна нулю. Для решения зависимости (1) в ВП GWFS использован метод конечных разностей (метод сеток), применение которого сводит дифференциальное уравнение (1) к системе алгебраических уравнений. Их решение осуществляется итерационным методом по неявной схеме (в ВП GWFS использован шахматный алгоритм Чебышева [5]). В последней версии программы добавлены следующие методы: PCG2 (метод сопряженного градиента) © US Geological Survey; SIP (метод неявного решения) © US Geological Survey; SSOR (метод послойной релаксации) © US Geological Survey; LMG (метод множественных сеток) © US Geological Survey.

Объект исследования. Объектом исследования являются подземные воды территории, ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка (междуречье «ВОЛГ»). Практически в ее центре расположен ядерно-энергетический комплекс БелАЭС (рис. 1).

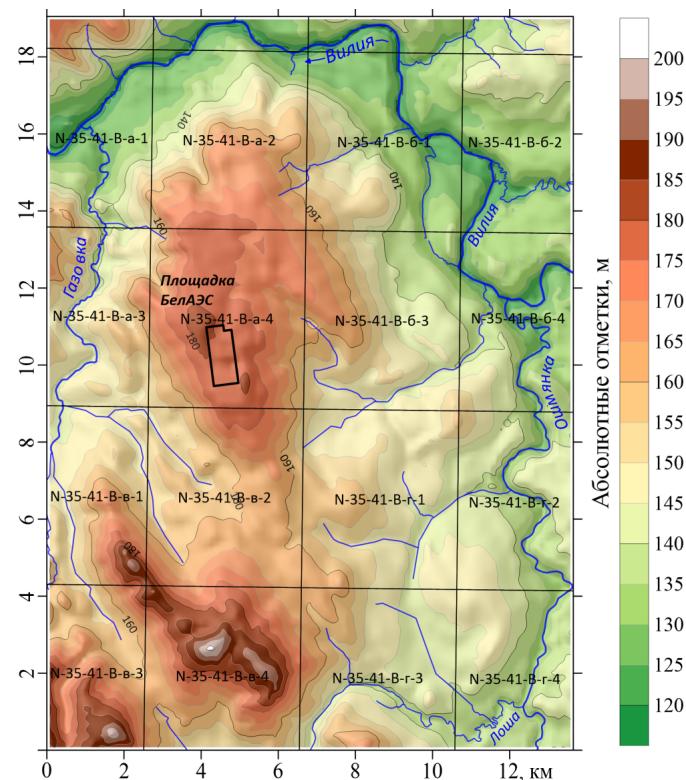


Рис. 1. Цифровая карта рельефа и гидрографической сети района Белорусской атомной электростанции (составил Ю. Ю. Трифонов)

Fig. 1. Digital map of the relief and hydrographic network of the Belarusian nuclear power plant area (compiled by Yu. Yu. Trifonov)

Согласно схеме гидрогеологического районирования [4], объект исследований расположен на западном склоне Белорусского гидрогеологического массива, разрез которого представлен породами кристаллического фундамента и осадочного чехла. По материалам бурения опорной скважины Островец-01 в пределах площадки размещения БелАЭС кристаллический фундамент, сложенный гранитогнейсами, вскрыт на глубине 531 м. Горные породы до глубины 537 м сильно выветрелые, до глубины 544 м – трещиноватые. Вскрытая мощность кристаллических пород 44,0 м. Вышележащие отложения осадочного чехла мощностью 531 м представлены образованиями верхнего протерозоя, палеозоя и кайнозоя. В разрезе область фильтрации представляет собой переслаивание водоносных горизонтов (комплексов) и слабопроницаемых слоев.

При схематизации природных условий в районе БелАЭС и площадки для размещения ПЗРО нами сохранены структура и содержание геофильтрационной модели, созданной в РУП «БелНИГРИ» с целью оценки эксплуатационных запасов подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения БелАЭС (руководитель работы А. А. Чекан, разработчик модели Б. И. Коробейников). В гидрогеологическом разрезе исследуемого объекта по наличию слабопроницаемых слоев выделено пять водоносных горизонтов и четыре разделяющих слабопроницаемых слоя. После схематизации в разрезе остаются два вида расчетных слоев – водоносные горизонты и разделяющие их слои; все запасы воды содержатся в водоносных горизонтах. Движение воды происходит по водоносным горизонтам вдоль напластования горных пород. Связь водоносных горизонтов осуществляется путем перетока воды через слабопроницаемые разделяющие слои в соответствии с их мощностью и проницаемостью. Расчетная схема в разрезе представлена на рис. 2.

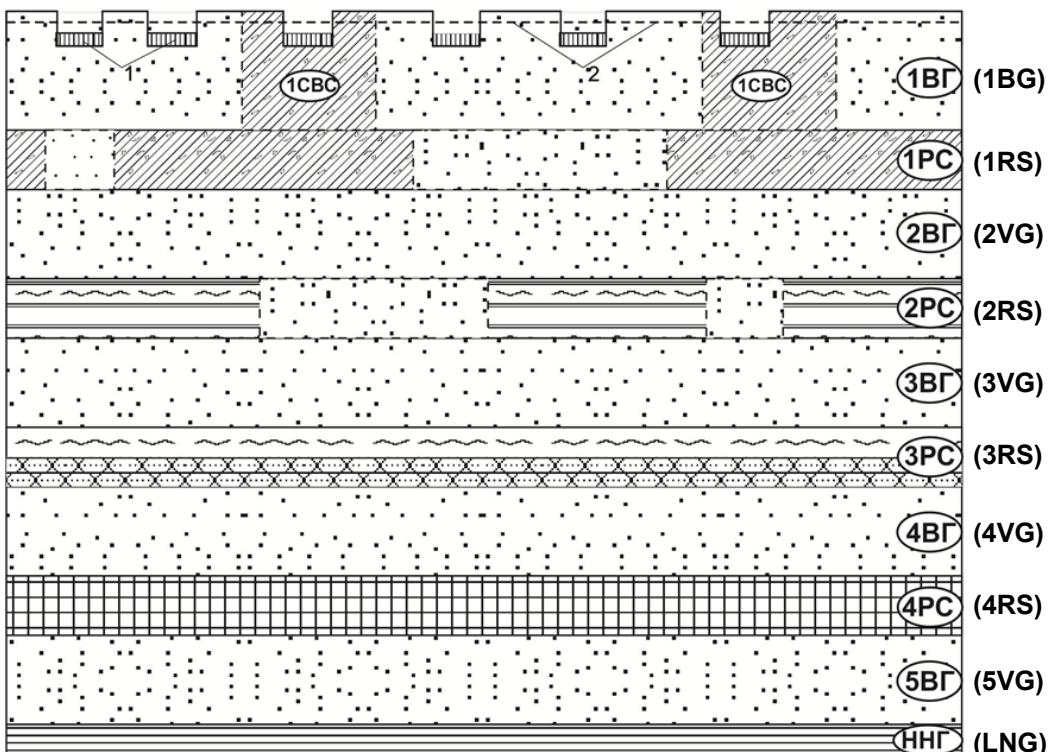


Рис. 2. Расчетная фильтрационная схема междуречья «ВОЛГА» в разрезе (на основе материалов РУП «БелНИГРИ» и РУП «Геосервис»):

1 – слабопроницаемые подрусловые отложения; 2 – уровенная поверхность грунтовых вод.

Водоносные горизонты: 1CВС – слабоводоносный слой (сожская морена в местах ее выхода на дневную поверхность); 1ВГ – грунтовый водоносный горизонт, приуроченный к современным аллювиальным, болотным, водно-ледниковым и моренным отложениям поозерского оледенения; 2ВГ – днепровский-сожский водно-ледниковый горизонт (комплекс); 3ВГ – березинский-днепровский водно-ледниковый горизонт (комплекс); 4ВГ – водоносный бриневский терригенный горизонт; 5ВГ – объединенный силурийский-девонский водоносный комплекс (горизонт).

Разделяющие слабопроницаемые слои: 1РС – моренные отложения сожского оледенения;

2РС – моренные отложения днепровского оледенения; 3РС – моренные отложения березинского оледенения и глины нижнего неогена; 4РС – отложения верхнего девона и нижнего неогена.

ННГ – нижняя непроницаемая граница (породы кристаллического фундамента)

Fig. 2. Calculation filtration scheme of the "VOLGA" interfluve in section (based on materials of the enterprise "BelNIGRI" and the enterprise "Geoservice"):

1 – weakly permeable sub-bed sediments; 2 – groundwater level surface.

Aquifers: 1WBC – weak water-bearing layer (Sozh moraine in places where it reaches the day surface); 1BG – ground water-bearing horizon confined to modern alluvial, bog, water-glacial and moraine sediments of the Poozerian glaciation; 2WG – Dneprovsky-Sozh water-glacial horizon (complex); 3WG – Berezinsky-Dneprovsky water-glacial horizon (complex); 4WG – water-bearing Brinevsky terrigenous horizon; 5WG – combined Silurian-Devonian water-bearing complex (horizon).

Separating weakly permeable layers: 1RS – moraine deposits of the Sozh glaciation; 2RS – moraine deposits of the Dnieper glaciation; 3RS – moraine deposits of the Berezinsky glaciation and clays of the Lower Neogene;

4RS – Upper Devonian and Lower Neogene deposits.

LNG – lower impermeable boundary (crystalline basement rocks)

По выделенным водоносным горизонтам и разделяющим слоям на основе материалов РУП «Геосервис» и РУП «БелНИГРИ» нами построены цифровые карты-схемы горизонтальной ($T = km$) и вертикальной ($A = k_0 / m_0$) водопроводимостей (где k и m , k_0 и m_0 – коэффициент фильтрации и мощность водоносного и слабопроницаемого слоев соответственно).

В первом от поверхности земли водоносном горизонте выделяется пять зон горизонтальной водопроводимости. 1-я зона: $T = 1 \text{ м}^2/\text{сут}$; 2-я зона: $T = 10 \text{ м}^2/\text{сут}$; 3-я зона: $T = 75 \text{ м}^2/\text{сут}$; 4-я зона: $T = 125 \text{ м}^2/\text{сут}$; 5-я зона: $T = 150 \text{ м}^2/\text{сут}$. Выделение зон горизонтальной водопроводимости первого водоносного горизонта проводилось на основе карты-схемы мощностей песков аллювиальных, водно-ледниковых поозерских и моренных сожских отложений. Всего выделено пять зон. 1-я зона: отложения отсутствуют; 2-я зона: $m = 0\text{--}10 \text{ м}$; 3-я зона: $m = 10\text{--}20 \text{ м}$; 4-я зона: $m = 20\text{--}30 \text{ м}$; 5-я зона: $m = \text{более } 30 \text{ м}$.

Для второго водоносного горизонта также построены карты-схемы мощностей песчаных отложений, а затем оценено среднее значение коэффициента фильтрации, полученное по данным обработки кустовых откачек, выполненных РУП «Геосервис». Всего во втором водоносном горизонте выделено пять зон мощностей песчаных отложений. 1-я зона: $m = 0\text{--}10 \text{ м}$; 2-я зона: $m = 10\text{--}20 \text{ м}$; 3-я зона: $m = 20\text{--}30 \text{ м}$; 4-я зона: $m = 30\text{--}40 \text{ м}$; 5-я зона: $m = \text{более } 40 \text{ м}$. По данным трех кустовых откачек, оборудованных на днепровский-сожский водоносный комплекс (скважины № 2ц, 9ц, 69ц), среднее значение коэффициента фильтрации составило $8,2 \text{ м}/\text{сут}$. Для построения цифровых карт горизонтальной проводимости принято $k = 8,0 \text{ м}/\text{сут}$. Поэтому во втором водоносном горизонте выделено пять зон горизонтальной проводимости. 1-я зона: $T = 40 \text{ м}^2/\text{сут}$; 2-я зона: $T = 120 \text{ м}^2/\text{сут}$; 3-я зона: $T = 200 \text{ м}^2/\text{сут}$; 4-я зона: $T = 250 \text{ м}^2/\text{сут}$; 5-я зона: $T = 350 \text{ м}^2/\text{сут}$. Выделенные зоны водопроводимости в качестве примера показаны на рис. 3.

Для обоснования карты-схемы горизонтальной проводимости третьего водоносного горизонта сначала была построена карта мощности песчаных отложений, в которой выделено шесть зон. 1-я зона: отложения отсутствуют; 2-я зона: $m = 0\text{--}5 \text{ м}$; 3-я зона: $m = 5\text{--}10 \text{ м}$; 4-я зона: $m = 10\text{--}15 \text{ м}$; 5-я зона: $m = 15\text{--}20 \text{ м}$; 6-я зона: $m = \text{более } 20 \text{ м}$. Затем по данным кустовой откачки из скважины № 16 были определены значения проводимости и коэффициента перетока. На базе этих данных вычислены значения водопроводимости третьего водоносного горизонта.

Четвертый водоносный горизонт изучен недостаточно. По нему выделено пять зон горизонтальной водопроводимости. 1-я зона: $T = 1 \text{ м}^2/\text{сут}$; 2-я зона: $T = 7,5 \text{ м}^2/\text{сут}$; 3-я зона: $T = 22,5 \text{ м}^2/\text{сут}$; 4-я зона: $T = 37,5 \text{ м}^2/\text{сут}$ и 5-я зона: $T = 51 \text{ м}^2/\text{сут}$. Для выделения этих зон были построены карты-схемы мощностей песков. 1-я зона: отложения отсутствуют; 2-я зона: $m = 0\text{--}5 \text{ м}$; 3-я зона: $m = 5\text{--}10 \text{ м}$; 4-я зона: $m = 10\text{--}15 \text{ м}$; 5-я зона: $m = \text{более } 15 \text{ м}$. Осредненное значение коэффициента фильтрации для тонко- и мелкозернистых песков ($k = 3,0 \text{ м}/\text{сут}$) принято по литературным источниками.

Пятый водоносный горизонт также плохо изучен. Его горизонтальная водопроводимость на основе материалов РУП «Геосервис» принята одним числом ($T = 53 \text{ м}^2/\text{сут}$ – среднее значение по кустовым откачкам из скважин № 4ц, 7ц, 11ц) [4].

Первый слабопроницаемый слой сложен супесями и суглинками сожской морены. По этому слою составлена карта-схема его мощностей в зонном представлении (1-я зона: $m_0 = 10 \text{ м}$; 2-я зона: $m_0 = 10\text{--}20 \text{ м}$; 3-я зона: $m_0 = 20\text{--}30 \text{ м}$; 4-я зона: $m_0 = \text{более } 30 \text{ м}$). Значения коэффициента фильтрации по данным РУП «Геосервис» изменяются от 0,001 до 0,26 м/сут. Для расчетов на модели принято $k = 0,01 \text{ м}/\text{сут}$. Всего по первому слабопроницаемому слою выделено четыре зоны вертикальной проводимости. 1-я зона: $A = 0,0002 \text{ 1}/\text{сут}$; 2-я зона: $A = 0,0007 \text{ 1}/\text{сут}$; 3-я зона: $A = 0,0004 \text{ 1}/\text{сут}$; 4-я зона: $A = 0,0003 \text{ 1}/\text{сут}$.

Второй слабопроницаемый слой в основном сложен супесями и суглинками днепровской морены. По этому горизонту была составлена карта-схема его мощностей с выделением шести зон. 1-я зона: $m_0 = 0\text{--}5 \text{ м}$; 2-я зона: $m_0 = 5\text{--}10 \text{ м}$; 3-я зона: $m_0 = 10\text{--}15 \text{ м}$; 4-я зона: $m_0 = 15\text{--}20 \text{ м}$; 5-я зона: $m_0 = 20\text{--}25 \text{ м}$; 6-я зона – более 25 м. Для расчетов на модели принято значение коэффициента фильтрации, равное $0,14 \text{ м}/\text{сут}$, которое получено при обработке материалов кустовой откачки из скважины № 16. Всего по второму слабопроницаемому слою выделено шесть зон вертикальной водопроводимости. 1-я зона: $A = 0,056 \text{ 1}/\text{сут}$; 2-я зона: $A = 0,019 \text{ 1}/\text{сут}$; 3-я зона: $A = 0,011 \text{ 1}/\text{сут}$; 4-я зона: $A = 0,008 \text{ 1}/\text{сут}$; 5-я зона: $A = 0,006 \text{ 1}/\text{сут}$; 6-я зона: $A = 0,005 \text{ 1}/\text{сут}$.

Третий слабопроницаемый слой представлен березинским моренным и нижненеогеновым комплексами. Для выделения зон вертикальной водопроводимости этого слоя был определен по литературным данным коэффициент фильтрации, равный $0,005 \text{ м}/\text{сут}$, а также построена карта-схема его мощностей, состоящая из шести зон. 1-я зона: отложения отсутствуют; 2-я зона: $m_0 = 0\text{--}5 \text{ м}$; 3-я зона: $m_0 = 5\text{--}10 \text{ м}$; 4-я зона: $m_0 = 10\text{--}15 \text{ м}$; 5-я зона: $m_0 = 15\text{--}20 \text{ м}$; 6-я зона: более 20 м. По этим данным было выделено шесть зон вертикальной водопроводимости третьего слабопроницаемого слоя: 1-я зона: $A = 0,1 \text{ 1}/\text{сут}$; 2-я зона: $A = 0,002 \text{ 1}/\text{сут}$; 3-я зона: $A = 0,00067 \text{ 1}/\text{сут}$; 4-я зона: $A = 0,0004 \text{ 1}/\text{сут}$; 5-я зона: $A = 0,00029 \text{ 1}/\text{сут}$; 6-я зона: $A = 0,00023 \text{ 1}/\text{сут}$.

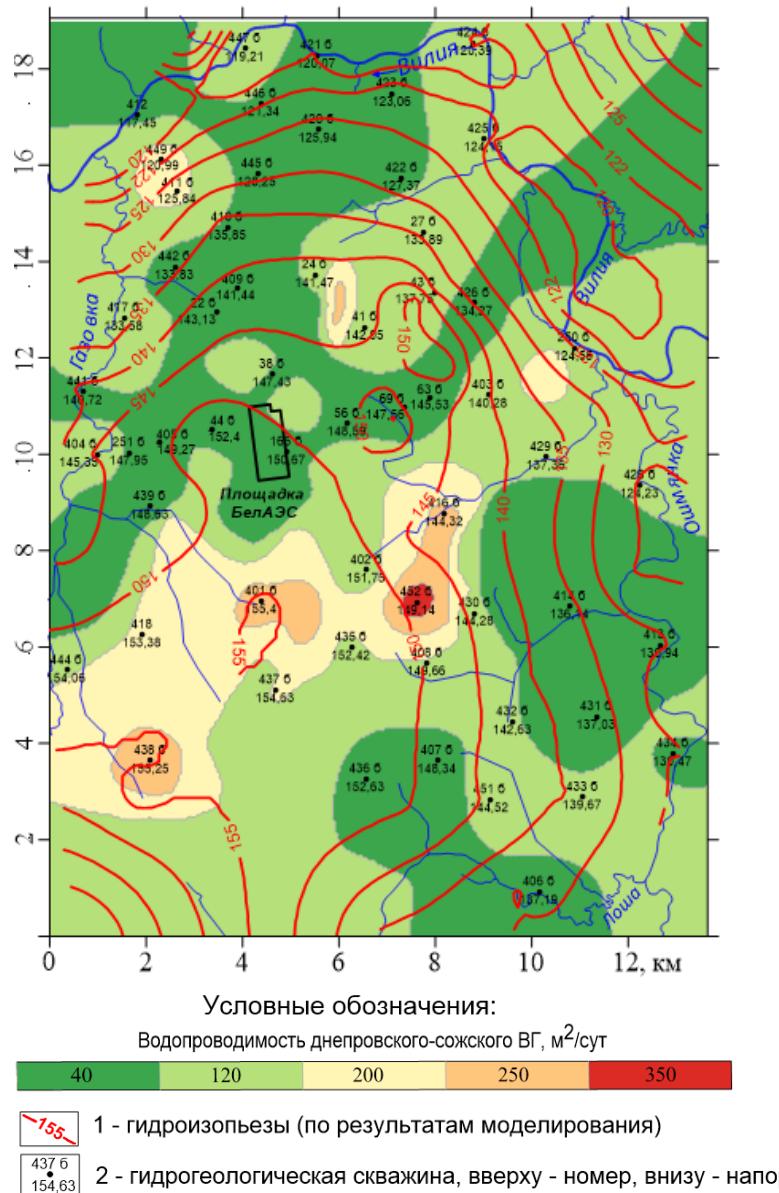


Рис. 3. Гидродинамическая карта днепровско-сожского водоносного горизонта

Fig. 3. Hydrodynamic map of the Dnieper-Sozh aquifer horizon

К четвертому слабопроницаемому слою отнесены глинистые отложениями неогена и девона. Изучены они недостаточно. Вертикальная проводимость слоя принята равной 0,01 1/сут по литературным данным.

Структура ЧГФМ объекта исследований. Для воспроизведения на ЧГФМ геологического строения и гидрогеологических условий междуречья «ВОЛГ» (рабочее название модели – «Bel-PZRO») моделируемая область в плане разбита на квадратные блоки (ячейки) размером 150 м × 150 м (всего 91 блок по оси X и 127 блоков по оси Y). В целом модель содержит 11 557 расчетных блоков (ячеек) в каждом слое.

В разрезе выделено 11 слоев: «зона аэрации», «поверхностные водоисточники», 5 водоносных горизонтов и 4 слабопроницаемых слоя. Зона аэрации в модели представлена двумя параметрами: интенсивность инфильтрационного питания и абсолютные отметки поверхности земли. При решении геофильтрационных задач в напорах наличие 2-го параметра позволяет вычислять глубины залегания УГВ. Слой «поверхностные воды» предназначен для задания данных по параметрам взаимосвязи подземных вод с поверхностными водотоками (водоемами). Для моделирования подпертого режима взаимосвязи заданы следующие параметры: признак наличия рек; абсолютные отметки уровней воды в реках; коэффициент проводимости ложа рек.

На внешних (боковых) границах исходной модели по всем водоносным горизонтам принятые граничные условия второго рода с нулевым расходом. Нижней границей моделируемой области являются слабопроницаемые отложения, подстилающие водоносный силурийский-девонский карбонатный комплекс, – преимущественно глинистые образования кембрия и ордовика, а также непроницаемые породы кристаллического фундамента. На верхней границе модели заданы напоры ГВ на период летне-осенней межени. Река Вилия и ее притоки представляют собой внутренние границы третьего рода.

Реализация гидродинамических условий на верхней границе модели «Bel-PZRO». Верхней границей ЧГФМ «Bel-PZRO» является уровенная поверхность ГВ (свободная поверхность потока). В моделях реальных гидрогеологических объектов она воспроизводится на основе карт гидроизогипс. Исходные данные для построения таких карт получают при изучении положения уровней ГВ в скважинах и колодцах, а также выходов (источников) ГВ на поверхность Земли. К верхней границе модели относится и гидрографическая сеть. Количественное представление уровенной поверхности ГВ, включая и межпластовые водоносные горизонты, зависит от особенностей решаемой гидродинамической задачи. При постоянной величине площадного питания ГВ задачу можно решать не в напорах, а в изменениях напоров подземных вод. Такое условие позволяет резко упростить реализацию гидродинамических условий на верхней границе – принять уровенную поверхность ГВ горизонтальной, т. е. напоры по всей территории задать одним числом (обычно $H = 0$). Назначение созданной ЧГФМ «Bel-PZRO» предопределяет необходимость решения гидродинамических задач в напорах (а не в изменениях напоров). Для решения задач в такой постановке, наряду со стандартным набором исходных параметров, требуется количественные данные об интенсивности инфильтрационного питания ГВ по всей площади моделируемого объекта. Такие сведения по междуречью Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка в настоящее время отсутствуют.

Решение задачи по оценке интенсивности инфильтрационного питания ГВ возможно при наличии карты гидроизогипс и данных об основных гидрогеологических параметрах по методике, разработанной нами совместно с А. А. Плетневым [6]. Суть методики заключается в задании над грунтовым (верхним) водоносным горизонтом фиктивной границы третьего рода в виде слабопроницаемого слоя и водоема. В фиктивном водоеме задаются такие же напоры, как и в самом водоносном горизонте. Коэффициент перетока (χ_f) фиктивного слабопроницаемого слоя между водоносным горизонтом и фиктивным водоемом выполняет роль коэффициента регуляризации, применяемого при решении некорректных задач по методу А. А. Тихонова. Его расчетное значение выбирается в зависимости от точности задаваемых на модели напоров.

Карта гидроизогипс в радиусе пятикилометровой зоны вокруг площадки БелАЭС имеется. Она составлена А. В. Кудельским в рамках государственной программы «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь на 2009–2010 годы и на период до 2020 года». Карта также опубликована в книге [4]. Хотя объект исследований в целом изучен весьма детально, карта гидроизогипс А. В. Кудельского мало пригодна для оценки площадного питания ГВ, так как хорошо изучены только площадки размещения БелАЭС и ПЗРО. Морфология рельефа в пределах междуречья весьма сложна, уклоны поверхности земли велики, а проницаемость подстилаемых отложений изменяется в очень широком интервале на коротких расстояниях. Построение представительной карты гидроизогипс, в особенности для больших по площади объектов, является весьма сложной и дорогостоящей задачей, так как требуются значительные финансовые и материальные затраты на бурение скважин и ведение режимных наблюдений. Отметки уровней ГВ между точками наблюдений определяются путем линейной интерполяции, что еще больше снижает достоверность и надежность карты. Можно утверждать, что с высокой степенью достоверности измеряются только уровни подземных вод в точках местоположения скважин и колодцев (при соблюдении технологии измерений).

В связи с этим для оценки интенсивности площадного питания ГВ на территории междуречья Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка нами использована связь между уровенной поверхностью ГВ и рельефом местности. На основе общеизвестной и всеми признанной связи между рельефом и депрессионной поверхностью ГВ также можно утверждать, что уровенная поверхность ГВ в сглаженной форме «повторяет» поверхность земли, снижаясь от возвышенных (междуречных) участков территории к дренирующим понижениям в рельефе [7].

Для оценки площадной вариации интенсивности инфильтрационного питания ГВ на основе сформулированных выше утверждений предлагается использовать методику Плетнева – Жогло [6], но отталкиваться от рельефа исследуемого объекта. Другими словами, над грунтовым (верхним) водоносным горизонтом задается фиктивная граница третьего рода в виде слабопроницаемого слоя с фиктивными напорами над его кровлей, равными абсолютным отметкам поверхности земли. В качестве аналога фиктивного слабопроницаемого слоя может рассматриваться зона аэрации. Данные по реальным пунктам мониторинга уровняенного режима ГВ используются в качестве контрольных точек, по которым производится согласование фактических и модельных величин напоров ГВ.

При обосновании технологии воспроизведения площадного питания ГВ учтено, что модель «Bel-PZRO» реализована на базе вычислительной программы GWFS [5], в которой инфильтрационное питание или испарение ГВ через зону аэрации вычисляется на основе уравнения

$$Q_{b,i,j} = Q_{r,i,j} + Q_{i,i,j} \quad (2)$$

где $Q_{r,i,j}$ – расход ГВ в поверхностные водотоки или приток воды в пласт из водотоков в пределах расчетного блока модели с координатами i, j ; $Q_{i,i,j}$ – инфильтрационное питание (испарение) ГВ через зону аэрации.

Инфильтрационное питание реализуется на основе зависимости

$$Q_{i,i,j} = w_{i,j} \Delta X_i \Delta Y_j, \quad (3)$$

где $w_{i,j}$ – интенсивность инфильтрационного питания в пределах расчетного блока модели с координатами i, j ; ΔX_i и ΔY_j – размеры блока по осям X и Y соответственно.

Взаимосвязь ГВ с поверхностными водотоками воспроизводится в соответствии с выражением

$$Q_{r,i,j} = T_{r,i,j} (H_{r,i,j} - H_{i,j}), \quad (4)$$

где $H_{r,i,j}$ и $H_{i,j}$ – абсолютные отметки уровней воды в реке и в грунтовом водоносном горизонте соответственно; $T_{r,i,j}$ – проводимость подрусловых отложений, причем

$$T_{r,i,j} = \chi_{r,i,j} N_{r,i,j} L_{r,i,j}, \quad (5)$$

где $\chi_{r,i,j}$ – коэффициент взаимосвязи водотока с подземными водами ($\chi_{r,i,j} = k_{r,i,j} / m_{r,i,j}$, где $k_{r,i,j}$ и $m_{r,i,j}$ – коэффициент фильтрации и мощность слабопроницаемых подрусловых отложений соответственно); $N_{r,i,j}$ и $L_{r,i,j}$ – ширина и длина русла реки в пределах расчетного блока модели соответственно.

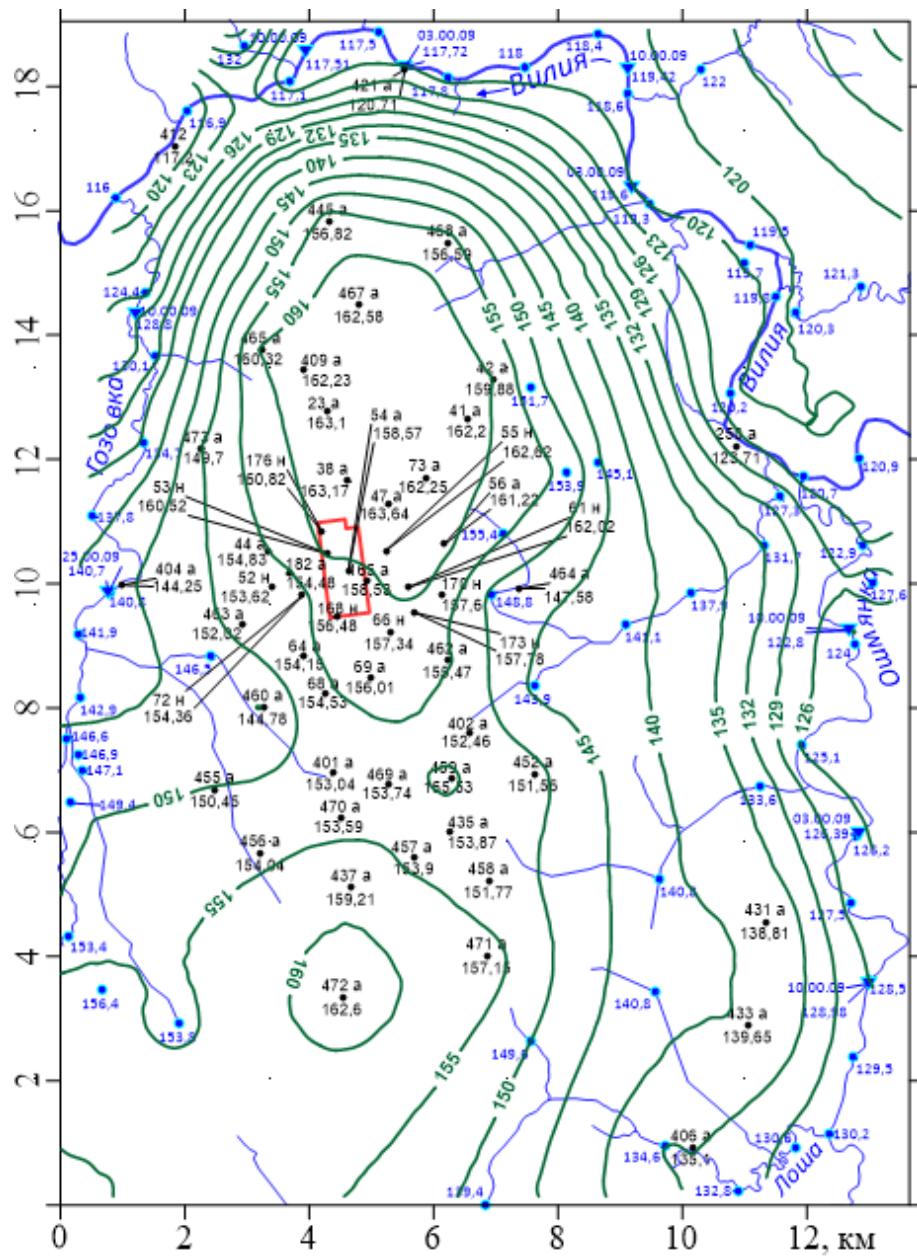
Калибрация ЧГФМ «Bel-PZRO». Калибрация исходной модели заключалась в решении эпигнозных задач по оценке коэффициента взаимосвязи речных и ГВ, коэффициента перетока слабопроницаемого слоя сожской морены и результирующей величины инфильтрационного питания при заданных граничных условиях и параметрах водоносных горизонтов путем согласования фактических и модельных напоров подземных вод грунтового и днепровского-сожского водоносных горизонтов на меженный период. Решение задачи производилось подбором путем прогонки ряда прямых задач при различных значениях искомых параметров. Для упрощения процедуры подбора коэффициентов перетока слабопроницаемого слоя сожской морены и взаимосвязи речных и грунтовых вод был использован методический подход, изложенный выше. Уточнение вертикальной проводимости (коэффициента перетока) сожской морены стало возможным благодаря высокой гидрогеологической изученности грунтового и днепровского-сожского водоносных горизонтов. Расчеты выполнены по методике, разработанной нами совместно с А. А. Плетневым [6, 8].

По терминологии И. К. Гавич [9] суммарный приток в расчетный блок через его верхнюю грань $Q_{b,i,j}$ в зависимости (2) представляет собой интегральную величину площадного (поблочного) питания ГВ, которое при заданных гидрогеологических параметрах и граничных условиях обеспечивает принятые к расчету уровни ГВ. Из рис. 3 и 4 видно, что использованные методические подходы решения обратной задачи позволили добиться приемлемой сходимости модельных и фактических напоров подземных вод днепровского-сожского и грунтового водоносных горизонтов в междуречье «ВОЛГ».

На втором этапе калибрации модели получен заданный модельный подземный сток в реки. При этом близость модельных и фактических уровней ГВ, а также напоров подземных вод по другим горизонтам, не ухудшилось. Значение модуля подземного стока в междуречье Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка взято нами с карт подземного стока, составленных С. С. Белецким [10, 11]. Его среднее значение равно 4,0 л/с км².

Для того чтобы получить на модели нужную величину подземного стока в реки, речная сеть и инфильтрационное питание ГВ должны быть воспроизведены на модели в явном виде. Реки, заданные на ЧГФМ «Bel-PZRO», показаны на рис. 1, 3, 4. Всего они содержатся в 693 расчетных блоках, что составляет 6,0 % от общего числа расчетных блоков модели «Bel-PZRO». Как видно, речная сеть на исследуемой территории имеет подчиненной значение. Объясняется это тем, что площадка БелАЭС находится на самой возвышенной части междуречья «ВОЛГ».

Результаты моделирования фильтрации подземных вод. По результатам расчетов на модели «Bel-PZRO» оценена структура баланса подземных и поверхностных вод, построены карты гидроизогипс (рис. 4) и глубины залегания ГВ, карты гидроизопьеэз днепровского-сожского и березинского-днепровского водоносных горизонтов, а также карта площадного питания ГВ.



Условные обозначения:

467 а 162,58	1 - гидрогеологические скважины, вверху - номер, внизу - уровень
163,6	2 - среднемноголетние уровни на урезах рек
10.03.09 151,2	3 - пункты разовых замеров уровней, вверху - дата, внизу - уровень
155	4 - гидроизогипсы (по результатам моделирования)

Рис. 4. Цифровая карта гидроизогипс междуречья Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка (по результатам моделирования)

Fig. 4. Digital map of hydroisogyps of the interfluvium Viliya – Gozovka – Losha – Oshmyanka (based on modeling results)

Суммарная величина результирующего питания ГВ, равная $91\ 994\ м^3/\text{сут}$ (высота слоя воды $128,8\ мм/\text{год}$), представляет собой наиболее обеспеченную часть естественных ресурсов подземных вод в междуречье «ВОЛГ». Их распределение по территории междуречья, площадь которого равна $260,0\ км^2$, показано на рис. 5.

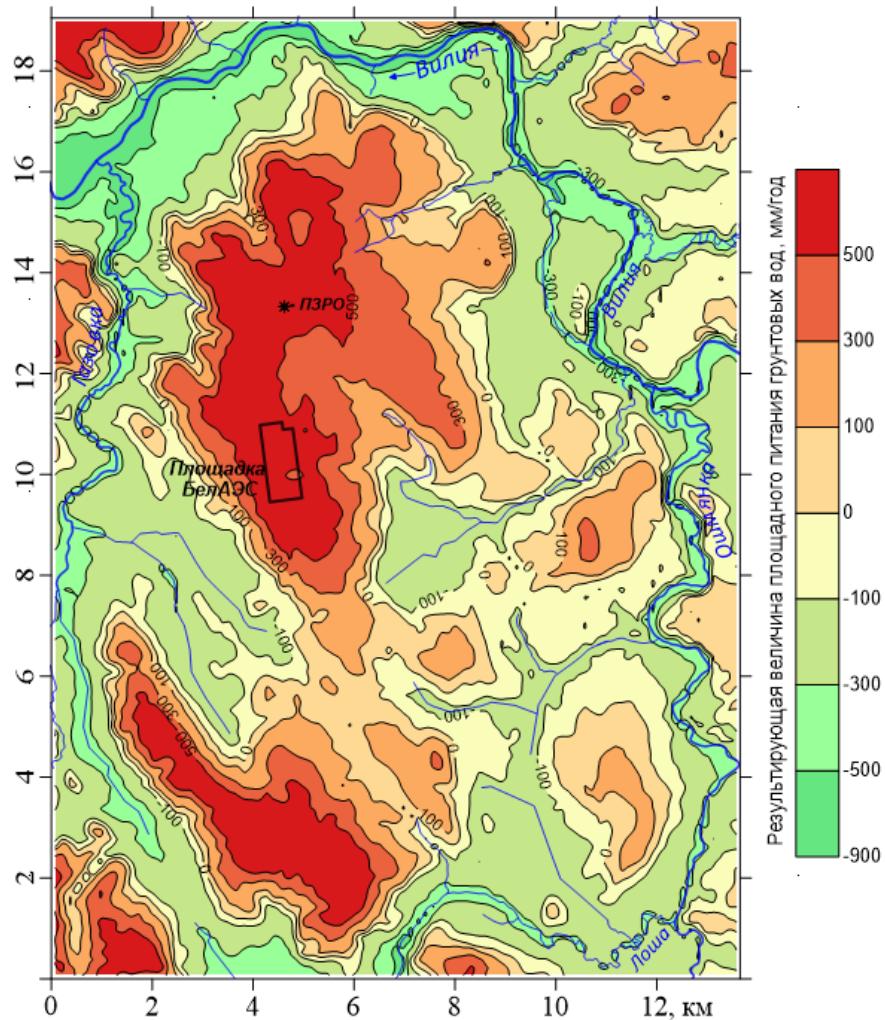


Рис. 5. Цифровая карта площадного питания и испарения грунтовых вод в междуречье Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка (по результатам моделирования)

Fig. 5. Digital map of areal recharge and evaporation of groundwater in the interfluve Viliya – Gozovka – Losha – Oshmyanka (based on modeling results)

Область питания ГВ составляет $172\ км^2$ (66 % территории междуречья). Разгрузка ГВ в речную сеть и путем испарения с депрессионной поверхности имеет место на территории площадью $88\ км^2$ (34 %). Интенсивность инфильтрационного питания и испарения изменяется весьма сильно даже на коротких расстояниях.

Расход ГВ осуществляется в нижележащий днепровский-сожский водоносный горизонт ($60\ 010\ м^3/\text{сут}$; слой стока $84,0\ мм/\text{год}$) и поверхностные водоисточники ($31984\ м^3/\text{сут}$; слой стока $44,8\ мм/\text{год}$). Инфильтрационное питание и испарение ГВ с депрессионной поверхности через зону аэрации по блокам с реками в отдельную статью баланса не выделено в связи с небольшими размерами расчетных блоков модели «Bel-PZRO» ($150\ м \times 150\ м$). По таким блокам модели вся результирующая величина питания (расходования) ГВ отнесена к поверхностным водоисточникам. Как видно, 65 % ресурсов ГВ расходуется на формирование ресурсов подземных вод нижележащих водоносных горизонтов.

Естественные ресурсы межпластовых вод днепровско-сожского водоносного горизонта равны 60 010 м³/сут (высота слоя воды 84,0 мм/год). Их формирование происходит за счет нисходящей фильтрации ГВ. Интенсивность питания на водоразделах через днепровскую морену изменяется по площади от нуля до 100 мм/год и более. В долине р. Вилия и на пониженных элементах рельефа имеет место восходящая разгрузка межпластовых вод (рис. 6).

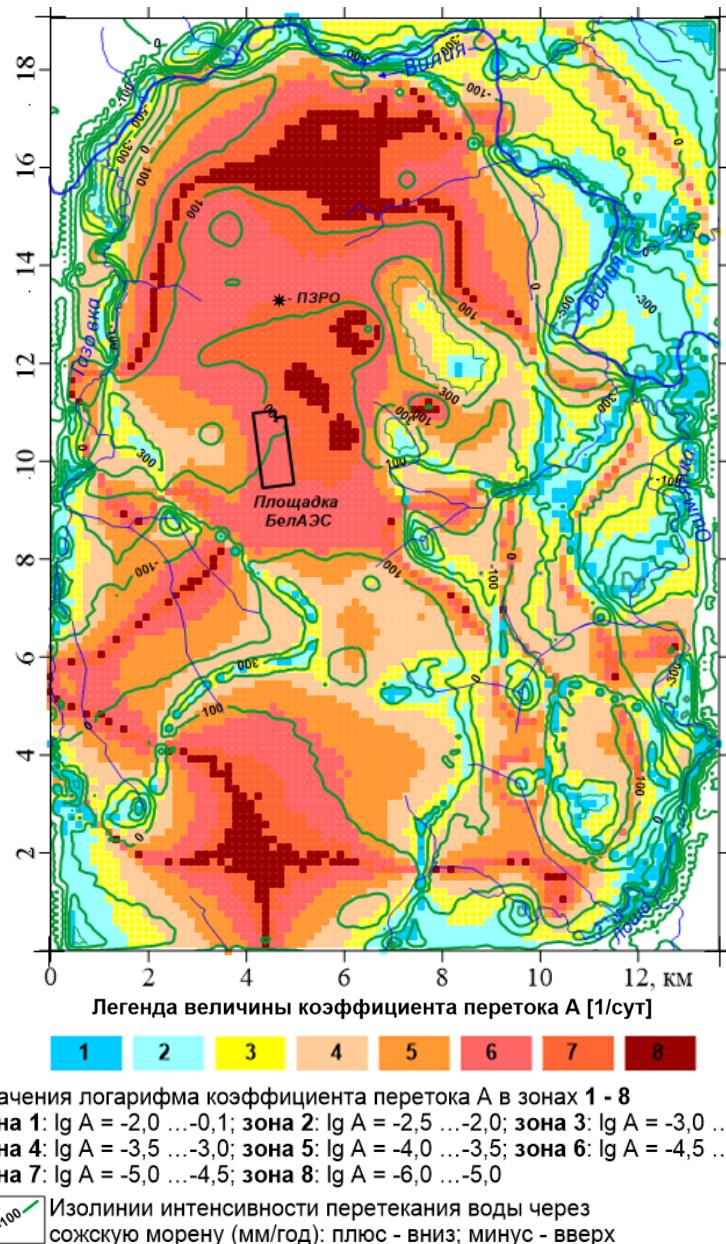


Рис. 6. Карта защищенности днепровско-сожского водоносного горизонта

Fig. 6. Map of the protection of the Dnieper-Sozh aquifer

На рис. 6 по результатам моделирования представлены количественные оценки вертикальной проводимости сожской морены и интенсивность водообмена между грунтовым и днепровско-сожским водоносными горизонтами, которые в целом характеризуют защищенность днепровско-сожского водоносного горизонта от источников поверхностного загрязнения. Стоит отметить, что по модельным оценкам вертикальная проницаемость слабопроницаемого слоя, представленного супесями и суглинками сожской морены, примерно на порядок ниже результатов, полученных РУП «Геосервис» по данным опытно-фильтрационных работ.

Заключение. На базе лицензионной вычислительной программы GWFS (ЗАО «Геолинк», Москва) создана ЧГФМ междуречья Вилия – Ошмянка – Лоша – Гозовка, предназначенная для численного моделирования миграции подземных вод в районе Белорусской АЭС. На модели воспроизведены грунтовый, днепровский-сожский, березинский-днепровский, бриневский и силурийский-девонский водоносные горизонты, разделяющие их слабопроницаемые слои, рельеф и гидрографическая сеть. Для численного моделирования взаимосвязи поверхностных, грунтовых и межпластовых вод использованы авторские методические разработки, применение которых дало возможность оценить величину естественных ресурсов подземных вод, формирующихся в междуречье «ВОЛГ». Из соотношения естественных ресурсов подземных вод грунтового и днепровского-сожского водоносных горизонтов следует, что в междуречье «ВОЛГ» вертикальная компонента фильтрации подземных вод существенно преобладает над ее горизонтальной составляющей.

Список использованных источников

1. Стратегия обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 2 июня 2015 г. № 460. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=12551&p0=C21500460&p1=1&p5=0>. – Дата доступа: 04.06.2015.
2. Сравнительные оценки безопасности захоронения радиоактивных отходов на альтернативных площадках Островецкого пункта на стадии концептуального проекта / Н. М. Ширяева [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Объед. Ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны. – Минск, 2010. – 64 с. – (Препринт ОИЭЯИ ; 44).
3. Выбор альтернативных площадок для размещения пункта захоронения радиоактивных отходов в Беларуси / Н. М. Ширяева [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Объед. Ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны. – Минск, 2010. – 38 с. – (Препринт ОИЭЯИ ; 43).
4. Подземные воды Островецкого региона Беларуси / А. В. Кудельский и [др.]. – Минск : Беларуская наука, 2012. – 101 с.
5. Постоянно действующие модели гидролитосферы территорий городских агломераций (на примере Московской агломерации) / Ю. О. Зеегофер [и др.]. – М. : Наука, 1990. – 198 с.
6. Жогло, В. Г. К оценке интенсивности площадного питания подземных вод / В. Г. Жогло, А. А. Плетнев // Доклады АН Беларуси. – 1992. – Т. XXXVI, № 11–12. – С. 1005–1007.
7. Всеволожский, В. А. Основы гидрогеологии / В. А. Всеволожский. – М. : Изд-во МГУ, 1991. – 351 с.
8. Жогло, В. Г. Оценка фильтрационных свойств слабопроницаемых отложений для прогноза качества подземных вод вблизи источника загрязнения / В. Г. Жогло, А. А. Плетнев // Доклады АН Беларуси. – 1996. – Т. 40, № 1. – С. 114–117.
9. Гавич, И. К. Многолетняя изменчивость питания и режима подземных вод природно-техногенных систем верхнего этажа гидролитосферы : обзор / И. К. Гавич ; АОЗТ «Геоинформмарк». – М., 1995. – Вып. 4. – 42 с. – (Гидрогеол. и инж. геология.).
10. Белецкий, С. С. Общий подземный сток БССР / С. С. Белецкий // Комплексное использование и охрана подземных вод БССР. – Минск, 1976. – С. 20–36.
11. Белецкий, С. С. Опыт оценки подземного стока в реки БССР / С. С. Белецкий // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. – Минск, 1974. – С. 60–74.

References

1. *Strategiya obrasheniya s radioaktivnymi othodami Belorusskoj atomnoj elektrostancii* [Strategy for managing radioactive waste of the Belarusian Nuclear Power Plant]. Available at: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=12551&p0=C21500460&p1=1&p5=0> (accessed June 4, 2015). (in Russian)
2. Shiryaeva N. M. [et al.] *Sravnitelnye ocenki bezopasnosti zahoroneniya radioaktivnyh othodov na alternativnyh ploschadkah Ostroveckogo punkta na stadii konceptualnogo proekta* [Comparative assessments of the safety of radioactive waste disposal at alternative sites at the Ostrovets site at the conceptual design stage]. National Academy of Sciences of Belarus, Joint Institute for Power and Nuclear Researches – Sosny. Minsk, 2010, 64 p. (in Russian)
3. Shiryaeva N. M., Skurat V. V., Yatsko S. N., Denisova V. V., Myshkina N. K., Tomina N. M., Zakharov A. A., Zhukova O. M., Belyashov A.V. *Vybor alternativnyh ploschadok dlya razmesheniya punkta zahoroneniya radioaktivnyh othodov v Belarusi* [Selection of alternative sites for locating a radioactive waste disposal facility in Belarus]. National Academy of Sciences of Belarus, Joint Institute for Power and Nuclear Researches – Sosny. Minsk, 2010, 38 p. (in Russian)
4. *Podzemnye vody Ostroveckogo regiona Belarusi* [Groundwater of the Ostrovets region of Belarus]. Minsk, Belaruskaya nauka Publ., 2012, 101 p. (in Russian)
5. Zeegofer Yu. O., Klyukvin A. N., Pashkovskij I. S., Roshal A. A. *Postoyanno dejstvuyushie modeli gidrolitosfery territorij gorodskih aglomeracij (na primere Moskovskoj aglomeracii)* [Permanent models of the hydrolithosphere of urban agglomeration territories (using the example of the Moscow agglomeration)]. Moscow, Navuka Publ., 1990, 198 p. (in Russian)

6. Zhoglo V. G., Pletnev A. A. *K ocenke intensivnosti ploshadnogo pitaniya podzemnyh vod* [Towards assessing the intensity of areal groundwater recharge]. *Doklady AN Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 1992, vol. XXXVI, no. 11–12, pp. 1005–1007. (in Russian)
7. Vsevolozhsky V. A. *Osnovy gidrogeologii* [Basics of hydrogeology]. Moscow, Moscow State University Publ., 1991, 351 p. (in Russian)
8. Zhoglo V. G., Pletnev A. A. *Ocenka filtracionnyh svojstv slabopronicaemyh otlozhenij dlya prognoza kachestva podzemnyh vod vblizi istochnika zagryazneniya* [Assessing the filtration properties of low-permeability sediments to predict the quality of groundwater near a pollution source]. *Doklady AN Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 1996, vol. 40, no. 1, pp. 114–117. (in Russian)
9. Gavich I. K. *Mnogoletnaya izmenchivost pitaniya i rezhima podzemnyh vod prirodno-tehnogennyh sistem verhnego etazha gidrolitosfery* [Long-term variability of the nutrition and regime of groundwater in natural-technogenic systems of the upper floor of the hydrolithosphere]. Review of AOZT "Geoinformmark", Hydrogeol., eng. geology, Moscow, 1995, Issue 4, 42 p. (in Russian)
10. Beleckij S. S. *Obshij podzemnyj stok BSSR* [Total underground flow of the BSSR]. Integrated use and protection of groundwater in the BSSR. Minsk, 1976, pp. 20–36. (in Russian)
11. Beleckij S. S. *Opty ocenki podzemnogo stoka v reki BSSR* [Experience in assessing underground flow into rivers of the BSSR]. *Issues of hydrogeology and engineering geology*. Minsk, 1974, pp. 60–74. (in Russian)

Информация об авторе

Жогло Василий Гаврилович – доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией гидрогеологии и гидроэкологии, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: w.zhoglo50@tut.by

Information about the author

Vasily G. Zhoglo – Dr. Sc. (Geological and Mineralogical), Docent, Head of the Laboratory of Hydrogeology and Hydroecology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoring Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: w.zhoglo50@tut.by