

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-204-221>
УДК 556.3(476.6)

Поступила в редакцию 13.05.2026
Received 13.05.2026

ГЕОМИГРАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РАДИОНУКЛИДАМИ В МЕЖДУРЕЧЬЕ ВИЛИЯ – ГОЗОВКА (РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ)

В. Г. Жогло

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Объектом исследования являются подземные воды зон активного и замедленного водообмена в междуречье Вилия – Гозовка. Цель исследования – прогноз возможного загрязнения подземных вод в случае утечек радиоактивных отходов Белорусской атомной электростанции (БелАЭС) из места их захоронения. Метод исследований – численное моделирование фильтрации и миграции подземных вод.

Для геомиграционного моделирования потенциального загрязнения подземных вод в междуречье Вилия – Гозовка создана и откалибрована трансграничная численная модель фильтрации и миграции подземных вод на территории, ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка. На модели воспроизведены грунтовый, днепровский-сожский, березинский-днепровский, бриневский и силурийский-девонский водоносные горизонты. В центре моделируемой области расположен ядерно-энергетический комплекс БелАЭС. Численная модель объекта реализована на базе программного обеспечения ModTech ЗАО «Геолинк» (г. Москва).

На созданной модели выполнено моделирование миграции радионуклидов в водонасыщенных горных породах и дана количественная оценка потенциального влияния источника загрязнения на качество подземных вод. По результатам геомиграционного моделирования составлены прогнозные карты активности радионуклидов в подземных водах грунтового водоносного горизонта на 20, 50, 100 и 200 лет, а на 300-летний период – для подземных вод грунтового, днепровского-сожского, березинского-днепровского и бриневского водоносных горизонтов.

Миграция радионуклидов вдоль напластования горных пород протекает крайне медленно. Максимальная скорость миграции не превышает 15,0–17,0 м/год. В течение 300 лет очаг загрязнения грунтовых вод не выходит за пределы моделируемого водосбора.

Ключевые слова: Островец; БелАЭС; РАО; ПЗРО; радионуклиды; подземные воды; инфильтрационное питание; радиоактивные отходы; схематизация; численное моделирование; геофильтрация; геомиграция; потенциальное загрязнение.

Для цитирования. Жогло В. Г. Геомиграционное моделирование потенциального загрязнения подземных вод радионуклидами в междуречье Вилия – Гозовка (Республика Беларусь) // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 204–221.

GEOMIGRATION MODELING OF POTENTIAL GROUNDWATER CONTAMINATION BY RADIONUCLIDES IN THE VILIYA – GOZOVKA INTERFLUVE (REPUBLIC OF BELARUS)

V. G. Zhoglo

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

Abstract. The object of the study is the underground waters zones of active and slow water exchange in the interfluence of Viliya Gozovka. The aim of the study is to forecast possible contamination of groundwater in case of leaks of radioactive waste (from the Belarusian nuclear power plant (BelNPP) from the place of their burial. Research method – numerical modeling of filtering and migration of underground waters.

For the geomigration modeling of potential groundwater pollution in the inter-Viliya-Gozovka region, a cross-border numerical model of filtration and migration of groundwater on the territory limited by the rivers Viliya, Oshmyanka, Losha and Gozovka has been created and calibrated. The model depicts the ground, Dnipro-Soga, Berezina-Dnipro, Brynev and Silurian-Devonian aquifers. In the center of the modelled area is located the nuclear energy complex BelNPP. The numerical model of the object is implemented on the basis of the software ModTech CJSC “Geolink” (Moscow).

In the created model, the migration of radionuclides into water-bearing rocks was modeled and a quantitative assessment of the potential influence of the source of pollution on groundwater quality was made. Based on the results of geomigration modeling, projected maps of radionuclide activity in groundwater of the groundwater aquifer for 20, 50, 100 and 200 years, and for 300-year period – for groundwater of the groundwater, Dnieper-Sochi, Berezini-Dnieper and Brynev aquifers.

The migration of radionuclides along rock plating is extremely slow. The maximum migration rate does not exceed 15.0–17.0 m/year. For 300 years, the source of groundwater pollution has not moved beyond the modelled catchment area.

Keywords: insulator; BeINPP; radioactive waste; radioactive waste disposal facility; radionuclides; groundwater; infiltration nutrition; radioactive waste; schematization; numerical modeling; geofiltration; geomigration; potential pollution.

For citation. Zhoglo V. G. Geomigration modeling of potential groundwater contamination by radionuclides in the Viliya – Gozovka interfluvium (Republic of Belarus). *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 204–221.

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь активно изучаются перспективы расширения своей атомной энергетики за счёт строительства второй атомной электростанции (АЭС) или третьего энергоблока на действующей БелАЭС [1, 2]. Основные проблемы развития связаны с обращением с РАО и высокой стоимостью вывода из эксплуатации ядерных объектов [3, 4].

Источниками радиоактивных отходов в Республике Беларусь являются БеАЭС, объекты ликвидации последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС), а также медицинские, научные и промышленные учреждения, использующие источники ионизирующего излучения (ИИИ). Твердые и жидкие РАО БелАЭС включают отработанное ядерное топливо (ОЯТ), которое временно хранится на станции, а также эксплуатационные отходы (фильтры, спецодежда, инструменты). Наследием Чернобыльской аварии являются пункты захоронения отходов дезактивации (ПЗОД), образовавшиеся после аварии на ЧАЭС (срезание грунта, снос зданий), преимущественно в Гомельской и Могилёвской областях. К историческому наследию относится хранилище РАО бывших военных объектов в Речицком районе Гомельской области (пункт «Гомель-30»). Источником РАО являются побочные продукты работы приборов, используемых в медицине (облучатели, радиофармпрепараты для диагностики и лечения, хроматографы), авиации (радиоизотопные датчики обледенения), промышленности (уровнемеры, дефектоскопы), науке (ускорители, радиохимические лаборатории), армии и гражданской обороне (дымоизвещатели, содержащие источники альфа-излучения – изотопы плутония), при поисках и разведке полезных ископаемых (толщиномеры, плотномеры). С течением времени эти приборы приходят в негодность, а отработанные РАО необходимо хранить. Первый полигон с хранилищами для радиоактивных отходов был построен в поселке Сосны под Минском в 1963 г. Полный комплекс работ по долговременному хранению и захоронению радиоактивных отходов в Республике Беларусь выполняет коммунальное унитарное предприятие (УП) «Экорес», в составе которого имеется специализированное предприятие по обращению с РАО. Планируется создание республиканского пункта захоронения РАО для централизованного сбора и изоляции отходов [4–6].

Изобилие источников радиоактивных веществ на территории Республики Беларусь обуславливают высокую актуальность задач по оценке долговременной безопасности приповерхностных пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) и долгосрочному прогнозу потенциального загрязнения подземных вод радионуклидами. Общепринятой во всем мире методологией оценок долговременной безопасности приповерхностных ПЗРО является методология МАГАТЭ ISAM (Improvement of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities). Вероятностная оценка долговременной безопасности приповерхностного ПЗРО, выполненная [7], показала, что при имеющем место необратимом характере процессов деградации, приводящих к снижению прочностных, фильтрационных и сорбционных свойств инженерных барьеров, временные закономерности их разрушения весьма условны, а, следовательно, выводы относительно приемлемой безопасности ПЗРО не всегда достаточно обоснованы [7, 8].

В работе [7] представлена интегральная вероятностная модель системы захоронения РАО и выполнены расчеты вероятностей отказов для различных сценариев эволюции системы. Проведенный анализ показал, что на временном интервале свыше 50 лет после закрытия объекта наибольший вклад в вероятность отказа системы ПЗРО вносят сценарии, связанные с отказом инженерных конструкций хранилища РАО. 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 разрушении инженерных барьеров. Расчеты показали, что уровня грунтовых вод (УГВ) 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 (^3H , ^{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 [7, 8].

В целом мировой опыт свидетельствует о том, что эксплуатация атомных электростанций оказывает негативное влияние на радиационное состояние подземных вод. В качестве одного из последних примеров является АЭС «Фукусима» в Японии, где радиоактивное загрязнение грунтовых вод приобрело большие масштабы и рассматривается в качестве одного из серьезнейших последствий произошедшей аварии. Достигнув уровня грунтовых вод, радионуклиды будут переноситься потоком

подземных вод к областям их разгрузки (реки, озера, родники) и к источникам хозяйственно-питьевого водоснабжения (водозаборы подземных вод, трубчатые колодцы). В связи с этим уже на стадии выбора мест размещения ПЗРО необходим долговременный прогноз миграции радионуклидов в подземных водах.

Случаи загрязнения подземных вод неоднократно фиксировались также на станциях, работавших в штатном режиме, в России, США и других странах. Согласно работе [1] существует объективная необходимость создания пункта захоронения радиоактивных отходов для обеспечения безопасной изоляции эксплуатационных радиоактивных отходов БелАЭС разных категорий. Строительство ПЗРО целесообразно выполнить на основе приповерхностного способа локализации.

Миграция загрязнений в ПВ протекает крайне медленно, поэтому краткосрочные прогнозы по оценке влияния источников загрязнения на качественное состояние ПВ являются малоинформативными. Низкую эффективность имеют и результаты натурных наблюдений из-за малых скоростей миграции и сложной пространственной структуры фильтрационного потока. В связи с этим гораздо больший интерес представляют долгосрочные (на десятки и сотни лет) прогнозные оценки влияния водорастворимых загрязняющих веществ на качество подземных вод.

Повышенная сложность процессов миграции, их медленное развитие во времени обусловили широкое использование в практике гидрогеомиграционных исследований методов математического моделирования при решении геофильтрационных и геомиграционных задач. «Возможность их широкого применения стимулируется наличием мощных вычислительных средств, развитостью математического обеспечения численных расчетов» [9, с. 3]. Данное заключение не потеряло своей актуальности до настоящего времени. Еще в 1980-е годы В. А. МIRONENKO, Е. В. МОЛЬСКИЙ и В. Г. РУМЫНИН констатировали [10, с. 70], что «оценка текущей ситуации и долговременный прогноз качества ПВ требуют достаточно ясных представлений о процессе миграции загрязнений в условиях конкретного объекта и о возможных теоретических моделях, описывающих этот процесс: опыт показывает, что в противном случае допускаются серьезные просчеты даже в качественном понимании тенденций загрязнения ПВ, а следовательно, и в принципиальных схемах водоохранных мероприятий. Отражение всей совокупности влияющих факторов в единой расчетной модели является обычно задачей исключительной трудности. К тому же всегда существует неопределенность исходных представлений о процессе, а также дефицит необходимой для его всестороннего описания исходной информации. Все это вынуждает ориентироваться на заведомо упрощенные математические схемы и делает необходимыми многовариантные разведочные оценки». На открытии IV Международной научно-практической конференции «Новые методы и технологии в водоснабжении и водоотведении» 2 апреля 2026 г. Председатель Президиума НАН Беларуси В. С. Караник отметил, что чистая вода – это не только бесценный дар природы, но и стратегический ресурс государства; перед государством и обществом стоит нетривиальная задача: с одной стороны, обеспечить полную доступность этого ценного ресурса, а с другой стороны – ее сохранность для будущих поколений [11].

Объект исследований – подземные воды зон активного и замедленного водообмена на территории междуречья Вилия – Ошмянка – Лоша – Гозовка. Характеристика геологического строения и гидрогеологических условий объекта дана в работе [12]. Настоящая статья представляет собой продолжение публикации [12].

Цель работы – смоделировать потенциальное загрязнение подземных вод радионуклидами в междуречье Вилия – Ошмянка – Лоша – Гозовка (междуречье «ВОЛГ»).

Основные задачи: 1) создать численную модель фильтрации и миграции подземных вод (ЧМФиМПВ) на территории, ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка; 2) смоделировать миграцию радионуклидов в подземных водах; 3) дать оценку потенциального влияния источника загрязнения на качество подземных вод.

Из работы [12] взяты лишь те материалы и результаты исследований, которые необходимы для однозначного понимания и толкования решаемых задач в данной статье.

Материалы и методы исследования. Информационной основой ЧМФиМПВ междуречья «ВОЛГ» являются материалы по геолого-гидрогеологическим условиям Островецкого региона, полученные в процессе научного сопровождения работ по обоснованию строительства БелАЭС. Их подробная характеристика дана в работах [12, 13].

Базовые геолого-гидрогеологические материалы накапливались в процессе выполнения государственных геологических съемок, научно-исследовательских работ ГП «НПЦ по геологии», ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси» по проблемам неогеодинимики и региональной гидрогеологии Беларуси (А. К. Карабанов, А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич и др.), а также разработок по проблеме «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. УП «Геосервис» (П. С. Лисовский, А. В. Петух, А. А. Чекан и др.), в результате которых была получена ценная информация по подземным водам на территории пятикилометровой зоны БелАЭС.

В качестве исходной геофильтрационной основы для ЧМФиМПВ междуречья «ВОЛГ» использована численная геофильтрационная модель (ЧГФМ) данного объекта. Детальная характеристика ЧГФМ междуречья Вилия – Ошмянка – Лоша – Гозовка, методика ее создания и результаты решения задач по количественной оценке условий формирования инфильтрационного водообмена и естественных ресурсов ПВ приведены в статье [12].

ЧГФМ и ЧМФиМПВ междуречья «ВОЛГ» созданы на базе лицензионного программного обеспечения (ПО) «ModTech» ЗАО «Геолинк Консалтинг»: ЧГФМ – на основе вычислительной программы (ВП) GWFS, (разработчик – А. А. Рошаль, г. Москва), ЧМФиМПВ – на основе ВП GWFS и MTS (Mass Transport Simulation – Моделирование массопереноса в подземных водах (разработчик – А. М. Свищев, ЗАО «Геолинк»)) [14]. Система управления качеством разработки ПО «Геолинк» в 2002 г. сертифицирована на соответствие требованиям международного стандарта ISO 9001:2000. Программа MTS предназначена для моделирования переноса в воде химического компонента и расчета распределения концентрации в пространстве и времени. Моделирование задач массопереноса в ПВ осуществляется на основе численного решения классического уравнения конвективной диффузии. Решение осуществляется методом характеристик, теория которого изложена в работах [14–16] и др.

Создание численной модели фильтрации и миграции подземных вод на территории междуречья «ВОЛГ». При разработке численной модели фильтрации и миграции подземных вод, ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка (рабочее название модели – «Bel-PZROm»), мы ориентировались на рекомендации авторов книги [10, с. 72–75]. Использованы также работы [17–23].

Объектом исследования являются подземные воды территории, в плане ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка, сверху – уровнем поверхности грунтовых вод, снизу – плотными водоупорными породами кристаллического фундамента. Практически в центре объекта расположен ядерно-энергетический комплекс БелАЭС (рис. 1).

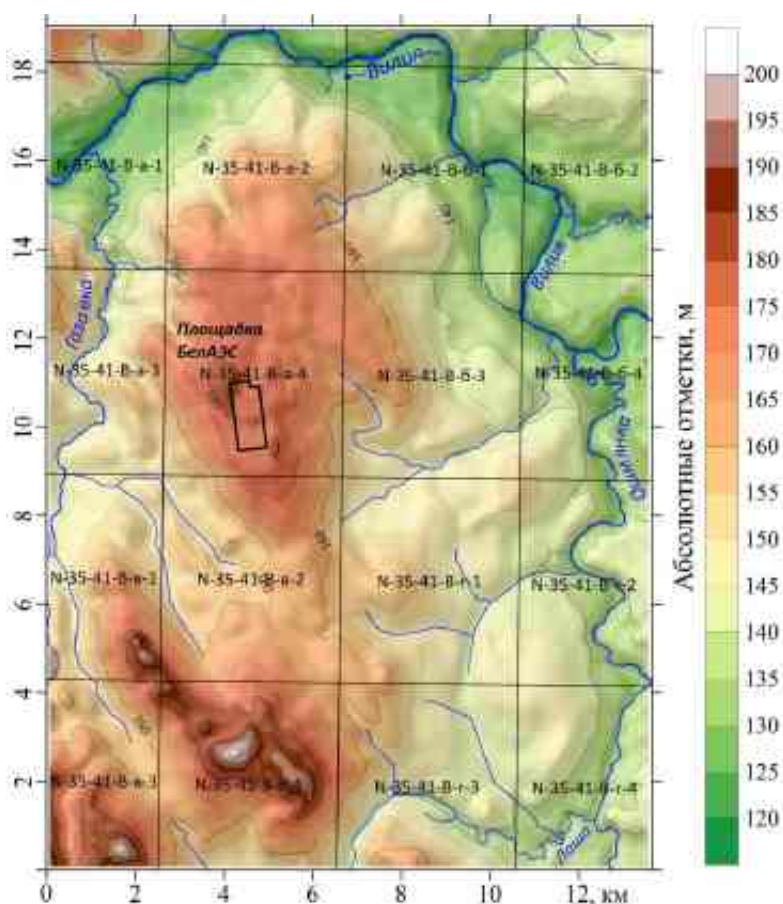


Рис. 1. Цифровая карта рельефа и гидрографической сети района БелАЭС (составил Ю. Ю. Трифонов)

Fig. 1. Digital map of the relief and hydrographic network of the BelNPP area (compiled by Yu. Yu. Trifonov)

При схематизации природных условий в районе БелАЭС и площадки для размещения ПЗРО нами сохранена структура и содержание геофильтрационной модели, созданной в УП «БелНИГРИ» (в настоящее время филиал «Институт геологии» ГП «НПЦ по геологии») с целью оценки эксплуатационных запасов подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения БелАЭС (руководитель работы – А. А. Чекан, создатель модели – Б. И. Коробейников). В вертикальном разрезе исследуемого объекта создателями модели выделено пять водоносных горизонтов (пластов) и четыре разделяющих слабопроницаемых слоя (РС). Расчетная схема в разрезе представлена на рис. 2.

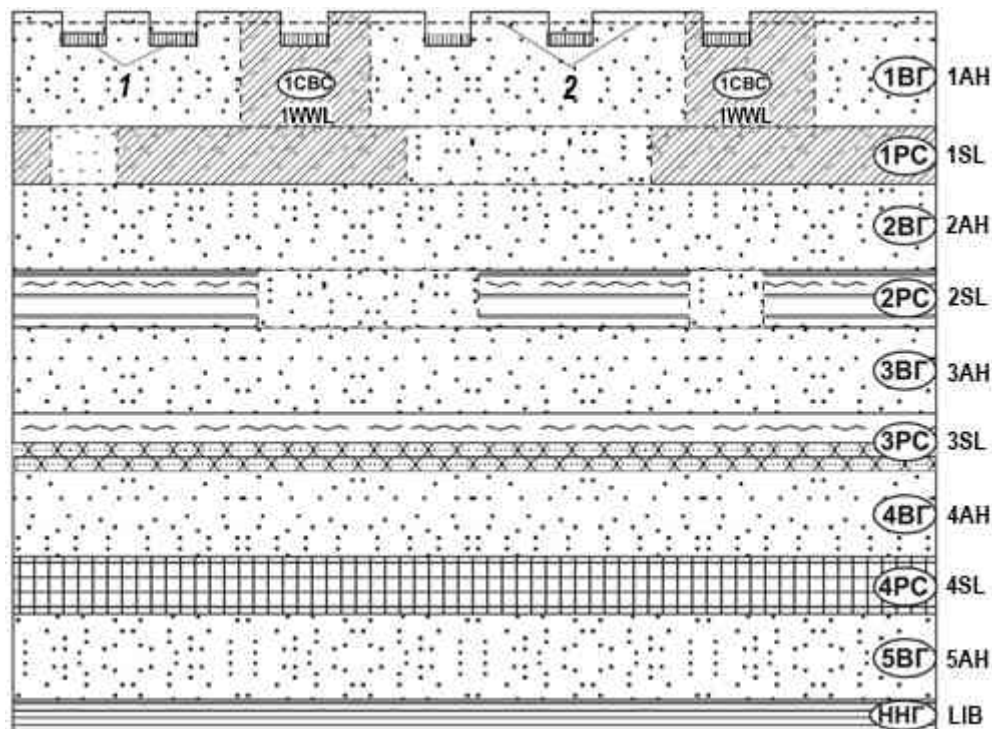


Рис. 2. Расчетная фильтрационная схема междуречья «ВОЛГ» в разрезе (на основе материалов УП «БелНИГРИ» и УП «Геосервис»):

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

Водоносные горизонты (пласты):

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

Разделяющие слабопроницаемые слои:

- 1PC – моренные отложения сожского оледенения; 2PC – моренные отложения днепровского оледенения;
 3PC – моренные отложения березинского оледенения и глины нижнего неогена;
 4PC – отложения верхнего девона и нижнего неогена; ННГ – нижняя непроницаемая граница (породы кристаллического фундамента)

Fig. 2. Calculated filtration scheme of the VOLGA interfluvium in the section (based on the materials of the UE "BelNIGRI" and UE "Geoservice"):

1 – Weakly permeable subsurface deposits; 2 – Level groundwater surface.

Aquiferous horizons (strata):

- 1WWL – weakly water-bearing layer (Sozh sea-on in places where it reaches the daytime surface);
 1AH – ground AH, confined to modern alluvial, marsh, water-glacial and moraine deposits of the Poozersk glaciation;
 2AH – Dneprovsky-Sozh water-glacial horizon; 3AH – Berezinsky-Dneprovsky water-glacial horizon;
 4AH – The Brinev terrigenous horizon; 5AH – combined Silurian-Devonian complex.

Separating weakly permeable layers:

- 1SL – moraine deposits of the Sozh glaciation; 2SL – moraine deposits of the Dnieper glaciation;
 3SL – moraine deposits of the Berezinsky glaciation and clay of the Lower Neogene;
 4SL – deposits of the Upper Devonian and Lower Neogene;
 LIB is the lower impenetrable boundary (rocks of the crystalline basement)

Аналогичные подходы использованы авторами работы [13] при построении геофильтрационной модели ПВ Островецкого региона в составе Государственной программы «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь на 2009–2010 годы и на период до 2020 года».

Для воспроизведения на ЧМФИМПВ «Bel-PZROm» геологического строения и гидрогеологических условий междуречья «ВОЛГ» моделируемая область в плане разбита нами 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 ячеек в каждом слое. В модели «Bel-PZROm» сохранены также информационные слои: «абсолютные отметки поверхности земли», «поверхностные воды», «инфильтрационное питание». Слой «абсолютные отметки поверхности земли» при решении геофильтрационных задач в напорах позволяет вычислять глубины залегания уровней грунтовых вод. Слой «поверхностные воды» предназначен для воспроизведения данных по параметрам взаимосвязи ГВ с поверхностными водотоками и водоемами, а также использован для расчленения модельного притока в «речные» блоки на расход ГВ в реки и инфильтрационный расход через зону аэрации. Слой «инфильтрационное питание» необходим для вычисления напоров ГВ и глубин их залегания при заданной величине интенсивности инфильтрационного питания. Слой использован также для воспроизведения инфильтрационного питания ГВ в явном виде при моделировании различных сценариев инфильтрационного водообмена. На внешних (боковых) границах исходной ЧМФИМПВ «Bel-PZROm» по всем водоносным горизонтам приняты граничные условия 2-го 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 3-го рода. Методика и технология воспроизведения гидродинамических условий на верхней границе модели «Bel-PZRO», включая интенсивность инфильтрационного питания грунтовых вод, детально изложена в статье [12].

Калибровка ЧГФМ «Bel-PZRO» заключалась в получении заданной величины подземного стока в реки и согласовании модельных и фактических напоров грунтовых вод на период летне-осенней межени путем определения коэффициента взаимосвязи речных и грунтовых вод, коэффициента перетока слабопроницаемого слоя сожской морены и результирующей величины инфильтрационного питания грунтовых вод при заданных граничных условиях и параметрах водоносных горизонтов. Решение производилось подбором путем прогонки ряда прямых задач при различных значениях искомых параметров. На калиброванной модели выполнено моделирование фильтрации подземных вод в естественных условиях (без воспроизведения на модели работы водозаборов). По результатам моделирования оценена структура баланса подземных и поверхностных вод, построены карты напоров подземных вод грунтового и днепровского-сожского водоносных горизонтов, а также карта площадного питания и испарения грунтовых вод. К результатам моделирования, в том числе, относится расчленение результирующей величины площадного питания грунтовых вод на разгрузку в реки (подземный сток), собственно инфильтрационное питание, а также разгрузку грунтовых вод в форме эвапотранспирации [12].

Моделирование фильтрации подземных вод в условиях работы водозаборов. В радиусе 15-километровой зоны БеАЭС эксплуатируются три групповых водозабора: 1) «Островец» – предназначен для водоснабжения г. п. Островец; 2) «Дегенево» – для водоснабжения городка энергетиков АЭС; 3) «Гервяты» – для обеспечения водой инфраструктуры БелАЭС [13]. Из всех водозаборов только «Гервяты» находится на территории, воспроизведенной на детальной ЧМФИМПВ «Bel-PZROm».

Участок месторождения «Гервяты» расположен в междуречье Вилии и ее притоков Гозовка и Ошмянка. В геоморфологическом отношении это морено-зандровая и озерно-аллювиальная равнина, включающая холмистую конечную морену, плоскую и пологоволнистую моренную равнину, волнистые поздне-поозерские зандры, цокольные и эрозионные террасы. Поверхность территории сформирована талыми водами поозерского ледника и сожской мореной. Процессами делювиально-пролювиального смыва межхолмовые понижения превращены в денудационные ложбины, которые часто унаследованы современной речной сетью. Наиболее возвышенные участки с абсолютными отметками поверхности 165–185 м приурочены к центральной водораздельной части территории (площадка АЭС). В западной, восточной и южной части преобладают абсолютные отметки 140–160 м, поверхность понижается к долинам рек. Рельеф осложнен ложбинами стока, впадающими в долины Гозовки и Ошмянки. Ложбины слабо заболочены, мелиорированы сетью дренажных каналов [13].

На участке месторождения «Гервяты» продуктивным является березинский-днепровский водно-ледниковый комплекс. Заявленная потребность в воде составляет 3500 м³/сут. Проектный водозабор включает три скважины с производительностью 1167 м³/сут каждая. На ЧМФИМПВ «Bel-PZROm» они воспроизведены как граничное условие 2-го рода с $Q = \text{const}$.

Решение гидродинамической задачи выполнено в стационарной постановке. Это означает, что оценивается максимально возможное воздействие водозабора «Гервенты» на гидрогеологическую обстановку в течение неограниченного периода времени. По результатам моделирования определена структура водного баланса в пределах моделируемой области, расчетные величины напоров и максимальные понижения уровней подземных вод по все водоносным горизонтам [12]. На рис. 3 и 4 настоящей статьи гидроизогипсы и гидроизоэпезы показаны сплошными линиями черного цвета.

Геофильтрационная схема условий миграции подземных вод. При расчетах переноса загрязнения в водоносных пластах, представленных дисперсными породами, определяющее значение обычно имеет конвективный перенос мигрантов с фильтрационным потоком, а различные формы дисперсии играют подчиненную роль. Поэтому расчёты переноса загрязнения производятся, прежде всего, на основе поля скоростей потока. Учитывая медленность процессов массопереноса, геофильтрационный поток рассматривается как стационарный (квазистационарный).

Значительное влияние на процессы переноса загрязнения оказывает профильная фильтрационная неоднородность потока по проницаемости, обусловленная слоистостью осадочных пород. Существуют два принципиально различных метода учёта такой неоднородности: непосредственной реализации профиля проницаемости при расчётах распределения скоростей переноса по мощности потока или опосредованного учёта профильной неоднородности в модели конвективно-дисперсионного переноса. Во втором случае определяются средние по глубине потока содержания мигрантов, а расчетные значения коэффициента дисперсии находятся по данным натурных наблюдений в аналогичных условиях [17, с. 275]. В созданной нами ЧМФИМПВ «Bel-PZROm» использован первый путь – непосредственной реализации профильной неоднородности пород по проницаемости, который, согласно [17], представляется предпочтительным, поскольку позволяет дать более конкретную оценку влияния профильной неоднородности на распространение контаминантов (загрязняющих веществ) по глубине потока, что особенно важно при изучении миграции загрязнения в потоках большой мощности.

Разнообразие механизмов переноса и рассеяния вещества в водонасыщенных горных породах, сложность форм нахождения загрязняющих веществ в ПВ, отсутствие надежных данных по основным миграционным параметрам водонасыщенных горных пород и грунтов в зоне аэрации, сложная пространственная структура геофильтрационного потока моделируемого объекта предопределяют необходимость выполнения прогнозных оценок качественного состояния ПВ на основе двух подходов: 1) использование наиболее жесткой расчетной схемы, гарантирующей определенный инженерный запас в расчетах; 2) последующее уточнение прогнозных оценок путем более полного учета в расчетных схемах пространственной изменчивости геофильтрационных и геомиграционных параметров, форм переноса вещества и физико-химических взаимодействий в системе вода – порода.

Аналогичный подход был реализован Объединенным институтом энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси при оценке влияния объектов хранения радиоактивных отходов спецпредприятия (СП) «Экорес» на качество подземных вод, используемых для водоснабжения. В работах [24, 25] приведены прогнозные оценки радиоактивного загрязнения грунтовых и межпластовых вод в зоне влияния СП «Экорес» по обращению с радиоактивными отходами.

СП «Экорес» находится вблизи минского городского водозабора «Дражня» и водозаборной скважины н. п. Фелицианово, эксплуатирующих межпластовые водоносные горизонты для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Минска и Минской области.

В рамках обоснования безопасности СП «Экорес» в работе [26] выполнены прогнозные оценки возможного загрязнения напорного водоносного горизонта вблизи н. п. Фелицианово, основанные на консервативном подходе (пессимистичный прогноз), который предполагал условия наиболее быстрой миграции радионуклидов из объектов хранения РАО СП «Экорес» в зону аэрации, грунтовые и межпластовые воды.

Согласно работе [26], «расчетные исследования выполнялись для семи радионуклидов, опасность которых выявлена на основе представленного анализа объектов хранения РАО СП «Экорес», а именно, для ^{14}C , ^{36}Cl , ^3H , ^{90}Sr , ^{239}Pu , ^{226}Ra , ^{238}U .

По консервативным оценкам концентрации радионуклидов ^{14}C , ^{36}Cl , ^{226}Ra , ^{238}U в воде напорного водоносного горизонта вблизи хранилищ РАО могут превысить в различные времена уровни вмешательства от потребления воды. По мере удаления от СП «Экорес» эти концентрации постепенно снижаются, и в месте водозабора содержание ^{36}Cl будет безопасным. Однако концентрации ^{14}C , ^{238}U в напорном водоносном горизонте могут существенно превысить этот критерий безопасности на всем протяжении от СП «Экорес» до места водозабора в н. п. Фелицианово через 150 (^{14}C) и 600 лет (^{238}U) после изоляции хранилища. Загрязнение напорного водоносного горизонта ^{226}Ra может произойти в более поздние сроки (2000 лет и более), причем в концентрациях, существенно превышающих уровень вмешательства.

По пессимистичному прогнозу при несанкционированном размещении скважин с забором воды из напорного водоносного горизонта на расстояниях около 200, 1000, 8800 м дозовые нагрузки населения могут превысить допустимый уровень для рассматриваемых групп населения в течение почти 500 лет как вблизи объектов РАО СП «Экорес», так и вблизи водозабора в н. п. Фелицианово, причем определяющими радионуклидами в последнем случае будут ^{238}U , ^{14}C и ^3H .

Выполненные консервативные прогнозные оценки показывают, что эксплуатация напорного водоносного горизонта может быть небезопасной, что требует принятия мер по предотвращению развития подобных событий».

Понятие «уровень вмешательства» авторы работы [26] не расшифровывают. Будем полагать, что имеется в виду такой дебит водозабора н. п. Фелицианово, при котором радионуклиды в определенный момент времени достигают водозаборной скважины.

Вполне может быть, что вывод авторов [26] о потенциальном загрязнении напорного водоносного горизонта в зоне влияния СП «Экорес» радионуклидами, является правильным. Но этот вывод не подтвержден соответствующими материалами и расчетами. В работах [24–26] нет фактических данных, достаточных для обоснования расчетной схемы фильтрации и миграции подземных вод на территории исследуемого объекта. Авторы работы [26] использовали консервативный подход, который предполагал условия наиболее быстрой миграции радионуклидов из объектов хранения РАО СП «Экорес» в зону аэрации, грунтовые и межпластовые воды. Такого подхода было бы достаточно, если бы авторы работы [26] по результатам прогнозных расчетов установили, что радионуклидное загрязнение не угрожает водозаборам г. Минска и н. п. Фелицианово. Является очевидным, что если загрязнение не произойдет при консервативном подходе, то тем более его не будет по результатам расчетов, в которых будут учтены процессы сорбции и другие физико-химические и гидрогеологические процессы. В связи с этим необходимо признать, что исследования [26] нельзя считать завершенными, так как полученные результаты, с одной стороны, не заслуживают доверия, и, с другой стороны, создают некоторую необоснованную социально-экологическую напряженность из-за возможного загрязнения подземных вод на объектах хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Иные результаты по прогнозу радиационного состояния подземных вод в районе водозабора «Сож» г. Гомеля получены нами еще в 1995–1997 гг. при выполнении НИР «Оценить поведение радионуклидов в геологической среде и динамику изменения радиационного состояния подземных вод в районе техногенного ореола ЧАЭС на территории Беларуси», задания 1 «Уточнить прогноз радиационного состояния подземных вод на водозаборах г. Гомеля»; договор № 32-6-3 (ГБЦД 91-22) в составе Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС в соответствии с распоряжением Президиума АН БССР № 109 от 27.03.1991 г. по договорам с Институтом радиобиологии Академии наук Беларуси. Все расчеты выполнены с помощью численной геомиграционной модели «SOG», созданной на базе вычислительной программы «MTS» (разработчик А. М. Свищев).

При решении миграционных задач в качестве мигранта рассматривался радиоцезий (Cs-137). Было принято, что его поступление в грунтовые воды происходит в виде инфильтрационного питания с концентрацией, пропорциональной поверхностному загрязнению радиоцезием. Данное положение основывалось на результатах, полученных ВСЕГИНГЕО по материалам режимных наблюдений в 1989–1992 гг. и результатам исследований [27–29] по юго-востоку Беларуси.

Плотность поверхностного загрязнения радиоцезием взята по картам радиационной обстановки, составленным Белорусским управлением по гидрометеорологии по состоянию на январь 1991 г. Учитывая данные по содержанию радиоцезия в поверхностных и грунтовых водах юго-востока Беларуси, приняты следующие расчетные концентрации радиоцезия в инфильтрующихся водах: зона с плотностью поверхностного загрязнения $1\text{--}5 \text{ Ки/км}^2$ – $1,0 \text{ Бк/л}$, зона $5\text{--}15 \text{ Ки/км}^2$ – $3,0$, зона $15\text{--}40 \text{ Ки/км}^2$ – $6,0$, зона с плотностью загрязнения более 40 Ки/км^2 – $9,0 \text{ Бк/л}$.

Воды поверхностных водоемов и водотоков считаются незагрязненными. Наиболее характерные для зоны влияния водозабора «Сож» значения мощностей и активной пористости водоносных горизонтов и разделяющих слоев приняты по фондовым материалам, причем в первую очередь использованы результаты разведочных работ ПО «Белгеология» (в настоящее время ГП «НПЦ по геологии») на водозаборе «Сож».

Моделирование миграции радиоцезия при проектной производительности водозабора «Сож» выполнено в двух вариантах: 1) сорбционные процессы не учитывались; 2) сорбция радиоцезия учтена заменой активной пористости (n) на эффективную емкость $N_m = n + K_r$, где K_r – коэффициент распределения. Не имея представительных данных о формах нахождения радионуклидов в подземных водах, с некоторым инженерным запасом, по данным [19, 30, 31], нами принято $K_r = 10$.

Основные результаты расчетов сводятся к следующему:

1. При отборе подземных вод по состоянию на 1991 г. даже через 30–40 лет активность Cs-137 в турон-маастрихтском водоносном горизонте не превышала 0,25 Бк/л на 90–92 % его площади. Лишь на северо-востоке моделируемой области, где в разрезе отсутствуют слабопроницаемые отложения палеогена, появляются «пятна» загрязнения с активностью Cs-137 до 1–2 Бк/л. Подтягивание Cs-137 к водозабору по пласту со стороны загрязненного северо-восточного района не происходило. Таким образом, при сохранении постоянного водоотбора опасность загрязнения радионуклидами подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта на водозаборе «Сож» отсутствует.

2. Увеличение дебита водозабора до проектной величины не ведет к росту масштабов загрязнения турон-маастрихтского водоносного горизонта. Несмотря на высокие скорости фильтрации подземных вод, по мере приближения к водозабору концентрация радионуклидов снижается за счет разбавления чистыми водами, поступающими из питающих водоносных горизонтов.

3. Прогнозная активность Cs-137 в воде, отбираемой из отдельных скважин при проектной производительности водозабора «Сож», достигала 0,35 Бк/л. В 80 % водозаборных скважин активность Cs-137 не превышала 0,1 Бк/л. Можно утверждать, что при условии сохранения чистоты речных вод значимого ухудшения качества подземных вод на водозаборе «Сож» в обозримой перспективе не произойдет.

4. При сорбции радионуклидов на поверхности минерального скелета горных пород загрязнение подземных вод в разрезе ограничивается грунтовым водоносным горизонтом, в котором прогнозная активность Cs-137 через 30 лет не превышала 0,9 Бк/л.

Более детально полученные результаты, а также характеристика использованных материалов, обоснование расчетной схемы фильтрации и миграции загрязняющих веществ изложены в публикациях [21, 27, 28]. В заключение отметим, что основную ценность представляют не числовые значения вычисленных показателей прогноза, а степень их надежности. Доверия заслуживают только те результаты, которые имеют высокий уровень обоснованности.

При геомиграционном моделировании изменения качества подземных вод в междуречье «ВОЛГ» нами принималось, что перенос мигранта в водоносных пластах происходит конвективно-дисперсионным путем. Коэффициенты дисперсивности водонасыщенных песков приняты по литературным источникам [17, 20, 21] одинаковыми для грунтового и межпластовых водоносных горизонтов (комплексов, пластов): коэффициент продольной дисперсии – 3,0 м; коэффициент поперечной дисперсии – 0,3 м, коэффициент задержки – 0,25. Процессы сорбции не учитывались. Наиболее характерные для исследуемого района значения активной пористости водоносных горизонтов и разделяющих слоев приняты по результатам полевых и лабораторных исследований, выполненных РУП «Геосервис» и обработан- ных А. В. Кудельским [13], а также по аналогии с Гомельским регионом [19, 21]: грунтовый водоносный горизонт – 0,10; днепровский-сожский водно-ледниковый комплекс – 0,18; березинский-днепровский водно-ледниковый комплекс – 0,18; бриневский терригенный комплекс – 0,13; силурийский-девонский водоносный комплекс – 0,15. Мощности водоносных горизонтов и разделяющих слоев заданы по материалам полевых работ РУП «Геосервис». Модельные величины напоров межпластовых и грунтовых вод, вычисленные при проектной производительности водозабора «Гервяты», приняты в качестве исходных на боковых границах всех водоносных пластов.

На верхней границе модели «Bel-PZROm» воспроизведены реки, инфильтрационное питание и эвапотранспирационная разгрузка грунтовых вод. При заданных таким образом граничных условиях решена геофильтрационная задача в стационарной постановке. Полученное поле скоростей подземных вод принято за основу при решении геомиграционной задачи.

Схематизация процессов массопереноса в районе площадки для размещения ПЗРО.

Основные аспекты собственно миграционной схематизации сводятся к следующему [10, с. 75]: «1) схематизация влияния процессов массопереноса на расчетную схему фильтрации; 2) схематизация физико-химического взаимодействия подземных вод с горными породами, а также физико-химических превращений, протекающих непосредственно в подземных растворах; 3) выявление относительной значимости отдельных механизмов конвективно-дисперсионного переноса; 4) обоснование целесообразности рассмотрения миграционных процессов в гетерогенных водоносных комплексах – с анализом возможностей сведения гетерогенных комплексов к квазигомогенным; 5) схематизация структуры миграционного потока; 6) схематизация граничных условий миграции; 7) схематизация развития миграционного процесса (в целом) во времени». Принятые нами для расчетов условия миграционной схематизации по каждому из перечисленных пунктов приведены ниже.

1. Численная геомиграционная модель района площадки для размещения ПЗРО БелАЭС ориентирована на моделирование миграции радионуклидов, которые, в силу ничтожно малых концентраций, не оказывают влияния на свойства подземных вод, поэтому принимается, что процессы массопереноса на расчетную схему фильтрации влияния не оказывают.

2. При схематизации физико-химических процессов общие допущения, традиционные для гидродинамической теории миграции, сведены к следующему: 1) термодинамические условия априорно считаются постоянными, независимо от миграционного процесса; 2) миграция каждого из компонентов рассматривается обособленно, без учета взаимного их влияния – и в растворе, и на минеральной фазе; 3) хотя для пластовых растворов характерно многообразие химических состояний содержащихся в них элементов, все оценки проводятся лишь для преобладающих миграционных форм с известными термодинамическими параметрами [10].

3. Максимальный интерес с позиций упрощения расчетной модели представляет оценка относительной значимости конвекции, с одной стороны, и гидродисперсии – с другой, на перенос мигрантов. Расчетные схемы, пренебрегающие гидродисперсией (схемы поршневого вытеснения), дают запас надежности при оценках значений концентрации вдоль траекторий фильтрации, выходящих из источника загрязнения. В численной модели фильтрации и миграции подземных вод «Bel-PZROm» параметры массопереноса задавались в виде диапазона наиболее вероятных значений. Использованы литературные источники, а также материалы Института «Сосны» (Н. М. Ширяева, В. Г. Молодых и др.) и Института природопользования НАН Беларуси (А. В. Кудельский, Н. М. Томина, Г. П. Бровка и др.). Так, в Институте природопользования НАН Беларуси получены [23] асимптотические решения задач конвективно-диффузионного переноса с учетом постоянной скорости конвективного потока влаги и кинетики сорбции водорастворимых соединений при линейной изотерме сорбции. В итоге авторы работы [23] пришли к выводу, что корректная оценка коэффициента гидродисперсии радионуклидов в природных дисперсных средах позволит более адекватно и точно рассчитывать динамику распространения радиоактивных загрязнений.

4. Согласно [10, с. 78–79] схематизация миграционного процесса в гетерогенных водоносных комплексах требует последовательного рассмотрения сменяющих друг друга в пространстве и во времени режимов массопереноса, в которых на первый план выходят различные механизмы миграции (конвекция, механическая дисперсия, молекулярная диффузия, физико-химические взаимодействия). С этой точки зрения можно говорить о многоуровневом протекании миграционного процесса, находящем свое формально-математическое отражение в описании различных стадий процесса различными моделями. Особое значение при этом имеют асимптотические модели переноса, дающие возможность существенно упростить весь последующий анализ; они позволяют использовать в качестве интерпретационных расчетные схемы для гомогенного пласта, в которых гетерогенность среды учитывается или простым ее расчленением на гомогенные элементы, или через некоторые обобщенные (эффективные) параметры. Для слоистых систем начальной асимптотической моделью служит модель послойного переноса, а конечной – модель однородного пласта с осредненными фильтрационными и суммарными емкостными характеристиками. В трещиновато-пористых породах такими асимптотиками служат модели микродисперсии (обмен между трещинами и блоками не проявляется) и предельная модель макродисперсии (пласт ведет себя как квазигомогенный). Важное место в подобной схематизации занимают разведочные расчетные оценки, которыми, в частности, определяются характерные пространственно-временные диапазоны различных режимов переноса, отвечающие различным уровням проявления гетерогенности.

На ЧМФИМПВ «Bel-PZROm» изложенные выше условия реализованы, в основном, в явном виде. В зоне аэрации и слабопроницаемых пластах миграция радионуклидов схематизирована как одномерный процесс, в водоносных горизонтах – как двумерный (плановый) процесс от ПЗРО к дренирующим водотокам. Для схематизации линейной сорбции радионуклидов в потоке подземных вод использован фактор сорбционной задержки.

Потенциальным источником загрязнения подземных вод являются радионуклиды, хранящиеся в ПЗРО. При некоторых чрезвычайных обстоятельствах возможно разрушение контейнеров, в которых хранятся отработанные радиоактивные отходы. В результате они проникают в зону аэрации и далее – в грунтовый водоносный горизонт.

Миграция РАО из расчетных блоков с источником загрязнения рассчитывается путем решения прогнозной задачи на модели «Bel-PZROm» в соответствии с пространственной структурой потока подземных вод и принятыми к расчету миграционными параметрами. Началу расчетного периода соответствует момент времени ($t_0 = 0$), при котором консервативный мигрант (радионуклид, иное загрязняющее вещество) поступает на уровенную поверхность грунтовых вод (на кровлю грунтового водоносного горизонта). Время миграции радионуклида с поверхности земли до уровня грунтовых вод вычисляется аналитически, на основе теории влагопереноса в зоне аэрации.

Моделирование миграции радионуклидов в подземных водах. Моделирование переноса радионуклидов выполнено на 300 лет с временным шагом $\Delta t = 10$ лет, а на 30-летний период – с временным шагом $\Delta t = 365$ сут. Решение получено на моменты времени $t = 1, 2, 3, \dots, 30, 40, 50, \dots, 300$ лет. С некоторым инженерным запасом (в сторону завышения масштабов загрязнения),

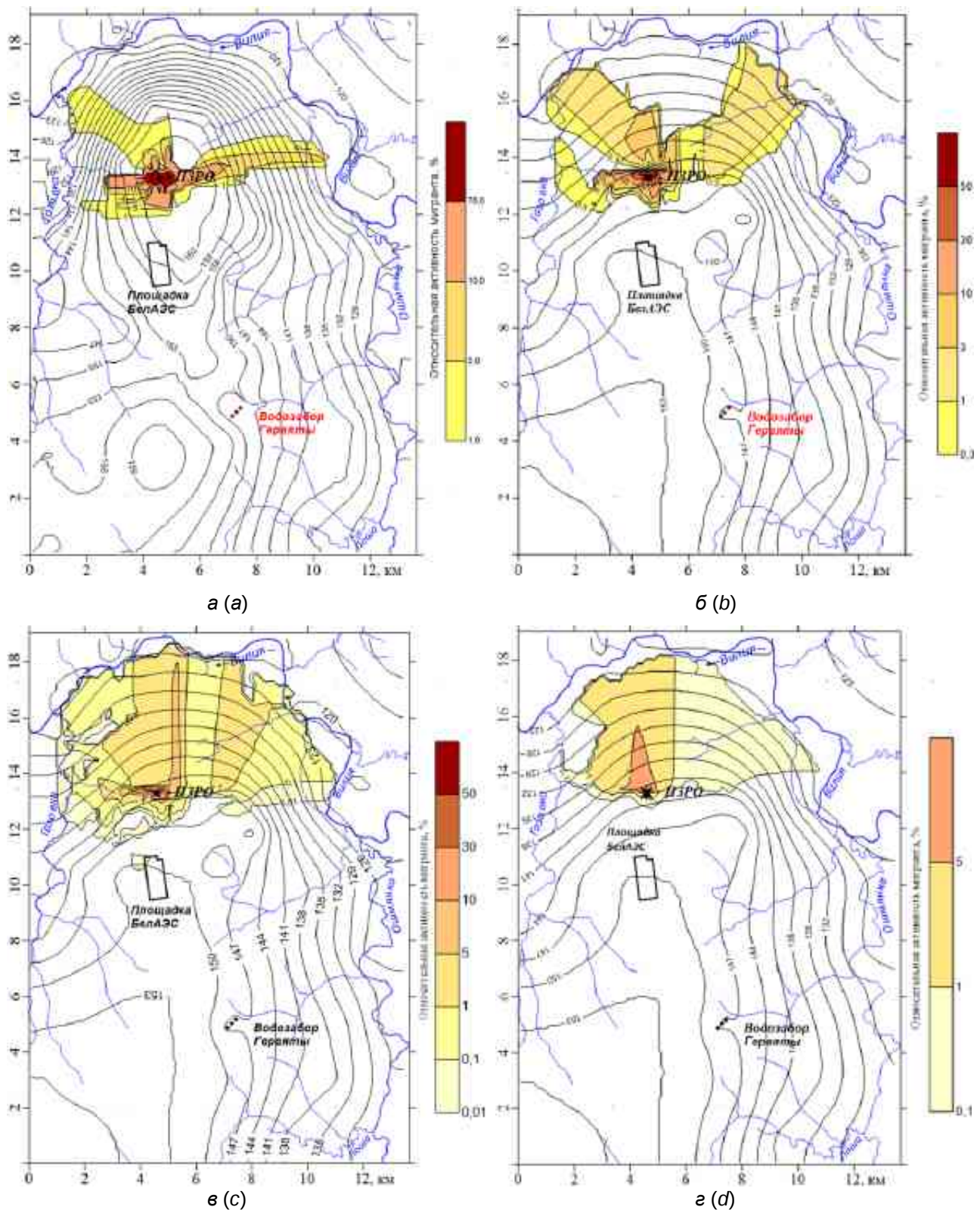


Рис. 3. Прогнозные карты активности радионуклидов в подземных водах грунтового (а), днепровско-сожского (б), березинского-днепровского (в) и бриневского (г) водоносных горизонтов на период времени 300 лет

Fig. 3. Forecast maps of radionuclide activity in the groundwater of the groundwater (a), Dneprovsky-Sozhsky (b), Berezinsky-Dneprovsky (c) and Brinevsky (d) aquifers for point in time 300 years

привязываясь к реальным временным датам, гипотетическая вычислительная схема имеет вид: 2025 г. – создание ПЗРО; 2026 г. – загрузка РАО в ПЗРО; 2027 г. – аварийное разрушение ПЗРО; конец 2029 г. – констатация признаков радионуклидов в грунтовых водах. Таким образом, началу прогнозного периода миграции радионуклидов (момент времени $t_0 = 0$) соответствует начало 2030 г.; конец прогнозного периода – 2330 г. В течение расчетного периода консервативный мигрант (радионуклид) поступает в грунтовый водоносный горизонт с расходом, равным интенсивности инфильтрационного питания в расчетных блоках модели, занимаемых ПЗРО. Концентрация (активность) мигранта на границе (в инфильтрующейся воде) принимается равной 100 % (или условных единиц – у. е.). Такой подход позволяет пересчитать результаты моделирования при любой концентрации мигранта на границе источника загрязнения.

По результатам геомиграционного моделирования определены расчетные значения концентрации мигранта по каждому блоку (ячейке) во всех водоносных горизонтах (пластах) по всему полю моделируемой области на заданные моменты времени. На их основе составлен пакет прогнозных карт возможного радиационного загрязнения подземных вод всех водоносных горизонтов (комплексов, пластов) на 300-летний период. Некоторые из них приведены на рис. 3 и 4. Динамика изменения средней и максимальной активности радионуклидов в подземных водах грунтового, днепровского-сожского, березинского-днепровского и бриневского водоносных горизонтов в очагах загрязнения отражена на рис. 5.

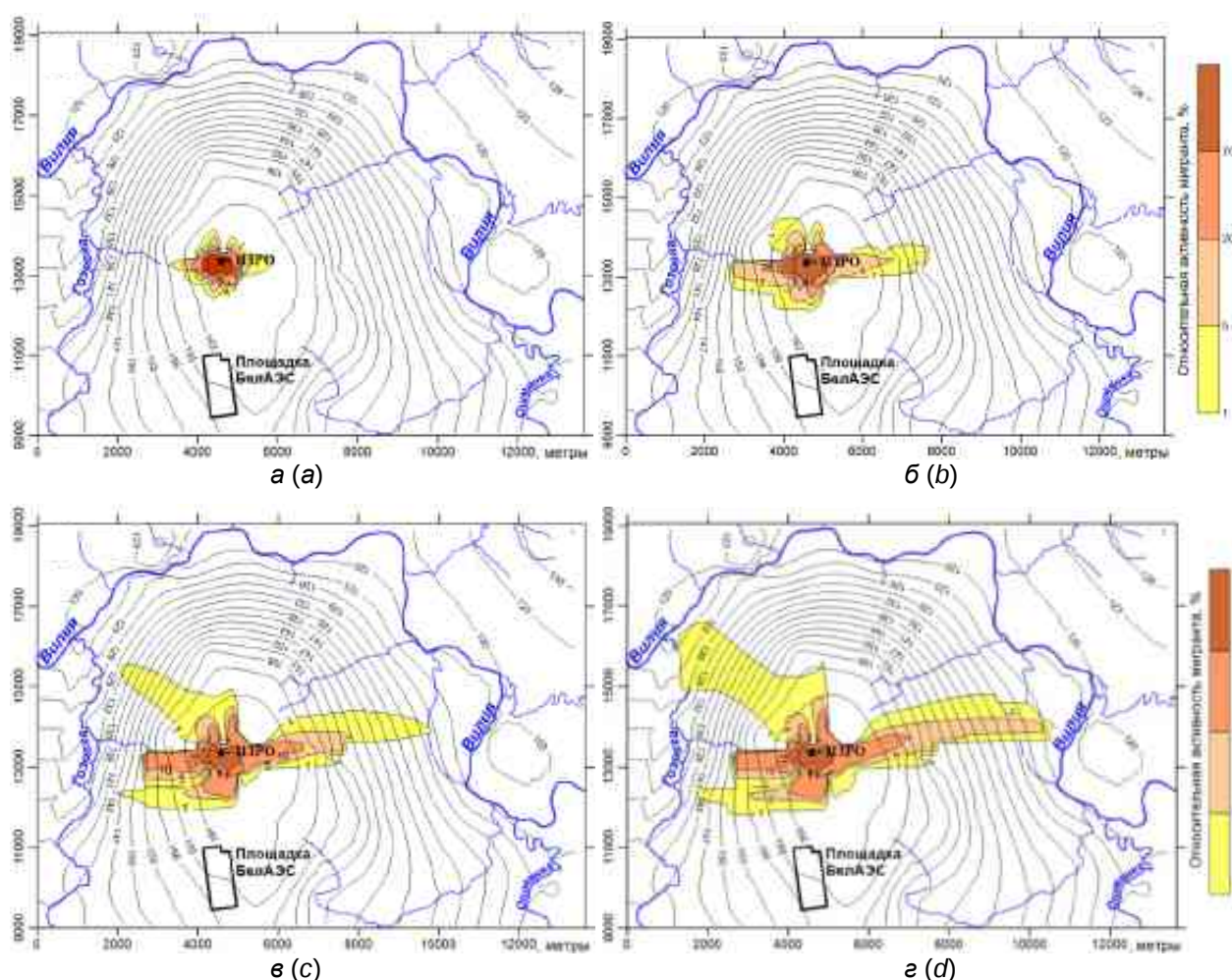
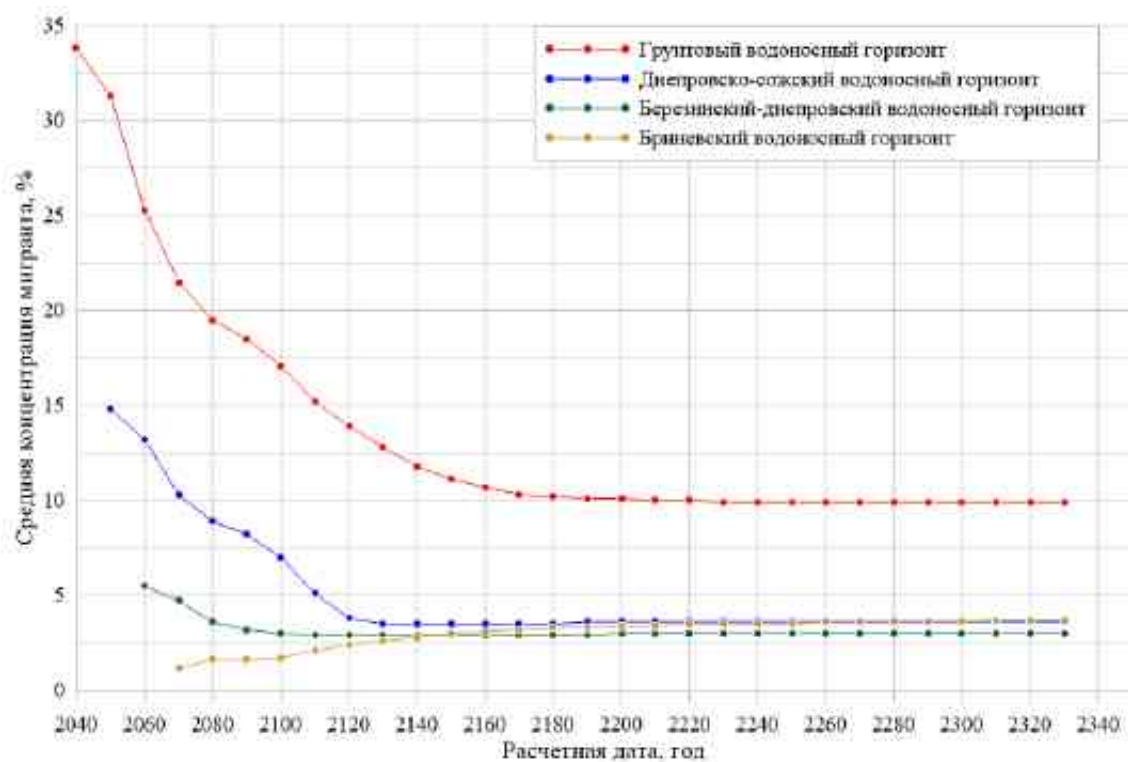
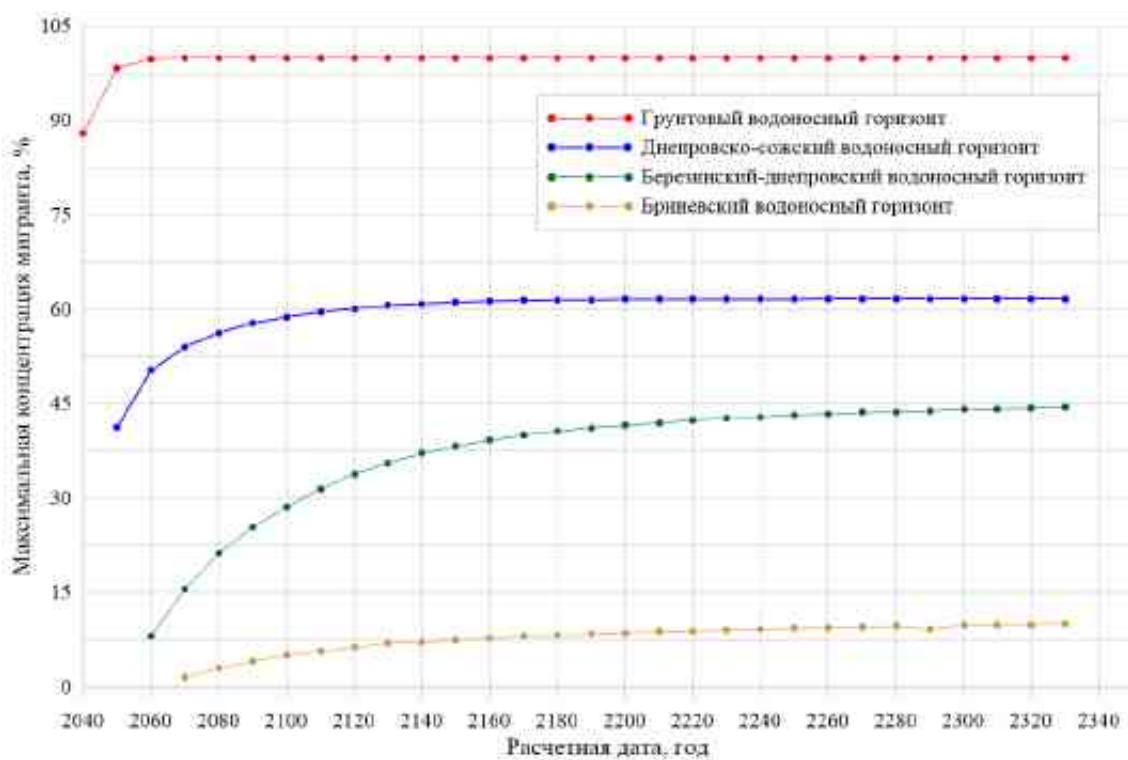


Рис. 4. Прогнозные карты активности радионуклидов в подземных водах грунтового водоносного горизонта на момент времени 20 (а), 50 (б), 100 (в) и 200 (г) лет

Fig. 4. Forecast maps of radionuclide activity in groundwater of the groundwater aquifer for point in time 20 (a), 50 (b), 100 (c) and 200 (d) years



а (a)



б (b)

Рис. 5. Динамика изменения средней (а) и максимальной (б) активности радионуклидов в подземных водах грунтового, днепровско-сожского, березинского-днепровского и бриневского водоносных горизонтов в ореолах загрязнения

Fig. 5. Dynamics of changes in the average (a) and maximum (b) activity of radionuclides in the groundwater of the groundwater, Dneprovsky-Sozhsky, Berezinsky-Dneprovsky and Brinevsky aquifers in pollution halos

Обсуждение результатов моделирования. Анализ рис. 3–5 показывает, что в междуречье Вилия – Ошмянка – Лоша – Гозовка миграция радионуклидов в плане, вдоль напластования горных пород, протекает крайне медленно. В течение 300 лет очаг загрязнения подземных вод грунтового, днепровско-сожского и березинского-днепровского водоносных горизонтов практически не выходит за пределы моделируемого объекта.

В грунтовом водоносном горизонте примерно через 20 лет наступает стабилизация режима миграции контаминантов – их приток в очаг загрязнения компенсируется оттоком загрязненных грунтовых вод в нижележащие водоносные горизонты.

В днепровском-сожском водоносном горизонте миграция радионуклидов (загрязняющих веществ, контаминантов) идет более интенсивно. За 300-летний период очаг загрязнения достигает рек Гозовка и Вилия. В долине Гозовки происходит частичный поворот очага загрязнения (лента тока с концентрацией мигранта от 0,1 до 1,0 у. е.) в северном направлении, что вызвано влиянием как конфигурации речной сети, так и потока подземных вод на противоположном берегу Гозовки (см. рис. 4). Максимальный уровень загрязнения в днепровском-сожском водоносном горизонте достигает 69,3 %. Через 80–90 лет, как и в грунтовом водоносном горизонте, наступает стационарный режим миграции.

В березинском-днепровском водоносном горизонте максимальный уровень загрязнения не превышает 52 %. Стационарный режим миграции не достигается даже за 300-летний период развития процесса. Однако площадь очага загрязнения расширяется.

В бриневском водоносном горизонте масштабы загрязнения продолжают расти даже спустя 300 лет после возникновения очага загрязнения в грунтовом водоносном горизонте.

В силурийском-девонском водоносном горизонте признаки загрязнения появляются лишь через 80 лет после возникновения очага загрязнения.

Выводы.

1. С целью геомиграционного моделирования потенциального загрязнения подземных вод радионуклидами на территории, ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка, создана численная модель геофильтрации и геомиграции. На модели воспроизведены грунтовый, днепровский-сожский, березинский-днепровский, бриневский и силурийский-девонский водоносные горизонты. В центре моделируемой области расположен ядерно-энергетический комплекс БелАЭС. Модель объекта реализована на базе специального программного обеспечения ModTech ЗАО «Геолинк» (г. Москва).

2. Выполнена схематизация процесса миграции подземных вод в районе площадки для размещения ПЗРО (междуречье Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка). Выделены характерные зоны миграции радионуклидов в вертикальном разрезе: зона аэрации; грунтовый и межпластовые водоносные горизонты (пласты); разделяющие слабопроницаемые слои. В зоне аэрации и слабопроницаемых слоях миграция радионуклидов схематизирована как одномерный (нисходящий или восходящий) процесс; в водоносных горизонтах (пластах) – как двумерный (плановый) процесс геофильтрации и геомиграции от ПЗРО к дренирующим водотокам.

3. На созданной модели выполнено моделирование миграции радионуклидов в водонасыщенных породах и дана количественная оценка потенциального влияния источника загрязнения на качество подземных вод. По результатам геомиграционного моделирования составлены прогнозные карты активности радионуклидов в подземных водах грунтового водоносного горизонта на 20, 50, 100 и 200 лет, а на 300-летний период – для подземных вод грунтового, днепровско-сожского, березинского-днепровского и бриневского водоносных горизонтов.

4. Миграция радионуклидов вдоль напластования горных пород протекает крайне медленно. Максимальная скорость миграции не превышает 15,0–17,0 м/год. В течение 300 лет очаг загрязнения грунтовых вод не выходит за пределы междуречья Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка.

5. В грунтовом водоносном горизонте примерно через 20 лет наступает стабилизация режима миграции контаминантов – их массовый приток в очаг загрязнения компенсируется оттоком загрязненных грунтовых вод в нижележащие водоносные горизонты. Процесс миграции во времени сопровождается ростом площади очага загрязнения и снижением концентрации мигранта в очаге.

6. В днепровском-сожском водоносном горизонте стабилизация режима миграции наступает примерно через 100–120 лет.

7. В бриневском водоносном горизонте максимальная концентрация радионуклидов на конец расчетного периода не превышает 10 у. е., но незначительный рост уровня загрязнения продолжается даже через 300 лет после возникновения очага загрязнения в грунтовом водоносном горизонте.

8. В силурийском-девонском водоносном горизонте признаки загрязнения появляются лишь через 80 лет после возникновения очага загрязнения.

Список использованных источников

1. Стратегия обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 2 июня 2015 г., № 460 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 06.06.2015, 5/40619. – 7 с. – URL: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=12551&p0=C21500460&p1=1&p5=0> (дата обращения: 14.04.2026).
2. Совещание о результатах работы БелаЭС, увеличении электропотребления и предложениях о строительстве новых атомных мощностей // Официальный интернет-портал Президента Республики Беларусь. – URL: <https://president.gov.by/ru/events/sovesanie-o-rezul-tatah-raboty-belaes-uvelichenii-elektropotreblenia-i-predlozeniah-o-stroitel-stve-novyh-atomnyh-mosnostej> (дата обращения: 14.11.2025).
3. Потапова Е. С. Атом перспектив. Развитие ядерной энергетики усиливает экономику Беларуси / Е. С. Потапова, А. М. Каранкевич // Официальный интернет-портал Палаты представителей Национального собрания Республики Беларусь. – URL: <https://house.gov.by/ru/interview-ru/view/atom-perspektiv-razvitie-jadernoj-energetiki-usilivaet-ekonomiku-belarusi-12573/> (дата обращения: 15.04.2026).
4. Обзор состояния ядерной и радиационной безопасности в Республике Беларусь за 2022 год // Интернет-портал Департамента по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. – URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/ff6/dfjims13b2tgwl9jjkrc2j1bw61tuosq/OBZOR_final.pdf (дата обращения: 14.04.2026).
5. Подход к выбору пункта размещения и площадки строительства специализированной организации по обращению с радиоактивными отходами / Н. М. Ширяева [и др.]. – Мн. : Препринт / НАН Беларуси, Объед. инт энергет. и ядер, исслед. – Сосны : ОИЭЯИ – 42, 2010. – 62 с.
6. Состояние и перспективы решения проблемы снижения радиоактивного загрязнения объектов для экологической реабилитации территорий после катастрофы на Чернобыльской АЭС и обеспечение безопасности при обращении с радиоактивными отходами / В. В. Скурат [и др.] // Европа – наш общий дом: Экологические аспекты : пленарные доклады международной научной конференции. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2000. – С. 249–261.
7. Вероятностная оценка долговременной безопасности приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов / Н. В. Горбачева [и др.] // Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров. Вывод из эксплуатации ЯРОО / Труды Второй международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию ФГУП «РАДОН», Сергиев Посад, 23–24 сент. 2020 г. – Сергиев Посад, 2020. – С. 31–35.
8. Кузьмина, Н. Д. Проблемы обеспечения радиационной безопасности при долговременном централизованном хранении радиоактивных отходов в Республике Беларусь / Н. Д. Кузьмина, М. Л. Жемжуров // Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров. Вывод из эксплуатации ЯРОО / Труды Второй международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию ФГУП «РАДОН», Сергиев Посад, 23–24 сент. 2020 г. – Сергиев-Посад, 2020. – С. 77–80.
9. Решение задач охраны подземных вод на численных моделях / Г. Н. Гензель, Н. Ф. Карачевцев, Коносовский [и др.]; под ред. В. А. Мироненко. – М. : Недра, 1992. – 240 с.
10. Мироненко, В. А. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах / В. А. Мироненко, Е. В. Мольский, В. Г. Румынин. – Л. : Недра, 1988. – 279 с.
11. Портал НАН Беларуси : [сайт]. – URL: <https://nasb.gov.by/rus/news/15597/> (дата обращения: 14.04.2026).
12. Жогло, В. Г. Численная геофильтрационная модель подземных вод междуречья Вилия – Гозовка (Республика Беларусь) // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 113–125.
13. Подземные воды Островецкого региона Беларуси / А. В. Кудельский [и др.]. – Мн. : Бел. навука, 2012. – 101 с.
14. Постоянно действующие модели гидrolитосферы территорий городских агломераций (на примере Московской агломерации) / Ю. О. Зеегофер [и др.]. – М. : Наука, 1990. – 198 с.
15. Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ; учеб. пособие / под ред. Р. С. Штенгелова. – М. : Изд-во МГУ, 1994. – 335 с.
16. Гидрогеологическое прогнозирование; пер. с англ. / под ред. М. Г. Андерсона и Т. П. Берта. – М. : Мир, 1988. – 736 с.
17. Шестаков, В. М. Динамика подземных вод : учеб. для студентов вузов / В. М. Шестаков. – 3-е изд. – М. : КДУ, 2009. – 334 с.
18. Шестаков, В. М. Динамика подземных вод / В. М. Шестаков. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1973. – 327 с.
19. Галкин, А. Н. Диффузионно-осмотические свойства глинистых грунтов Гомельского промышленного района : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 04.00.07 / МГУ им. М. В. Ломоносова. М., 1999. – 22 с.
20. Драйвер, Дж. Геохимия природных вод / Дж. Драйвер; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 440 с.
21. Жогло, В. Г. Система численных геофильтрационных моделей верхнего этажа гидrolитосферы юго-востока Республики Беларусь / В. Г. Жогло. – Мн. : Ин-т геол. наук, 2001. – 176 с.
22. Капырин, И. В. Расчетный комплекс GeRa для моделирования процессов геофильтрации и геомиграции радионуклидов / И. В. Капырин, Ю. В. Василевский, А. В. Расторгуев // Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование и практика : материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 60-летию основания кафедры гидрогеологии МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 22–24 мая 2013 г. – М., 2013 – С. 235–240.
23. Бровка, Г. П. Оценка параметров гидродисперсии и ее влияния на конвективно-диффузионный перенос радиоактивных загрязнений в природных дисперсных средах / Г. П. Бровка, И. Н. Дорожок // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 1. – С. 71–77.

24. Оценка воздействия на грунтовые воды объектов хранения радиоактивных отходов по упрощенной технологии на спецпредприятии «Экорес» / Н. М. Ширяева [и др.]. – Мн. : Препринт / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны ; ОИЭЯИ – 60, 2013. – 48 с.
25. Оценка воздействия на грунтовые воды хранилищ радиоактивных отходов, выполненных по типовому проекту, на спецпредприятии «Экорес» / Н. М. Ширяева [и др.]. – Мн. : Препринт / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны ; ОИЭЯИ-61, 2014. – 36 с.
26. Оценка влияния объектов хранения радиоактивных отходов спецпредприятия «Экорес» на качество подземных вод напорных горизонтов, используемых для водопользования / Н. М. Ширяева [и др.]. – Мн. : Препринт / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны ; ОИЭЯИ – 62, 2014. – 32 с.
27. Жогло, В. Г. Прогноз радиационного состояния подземных вод на водозаборе «Сож» г. Гомеля / В. Г. Жогло, А. Ф. Акулевич // Научные чтения «Проблемы охраны геологической среды» : тез. докл. 1-й науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня рожд. акад. АН БССР Г. В. Богомоллова, Минск, 19–21 апр. 1995 г. / отв. ред. Л. А. Демидович, В. П. Клементьев ; Мин-во образования и науки Респ. Беларусь, Мин-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, Бел. гос. концерн «Белхимнефтепром». – Мн., 1995. – С. 81–82.
28. Акулевич, А. Ф. Исследование радиоактивного загрязнения подземных вод в районе водозабора «Сож» / г. Гомеля / А. Ф. Акулевич, В. Г. Жогло, В. П. Ильин // Поиски и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь : сб. науч. трудов. – Гомель : БелНИПИнефть, 1997. – Вып. 2. – С. 201–206.
29. О радиоактивном загрязнении природных вод и водной миграции радионуклидов на юго-востоке Белоруссии / А. В. Кудельский [и др.] // Доклады АН БССР. – 1990. – Т. 34, № 11. – С. 1039–1042.
30. Кудельский, А. В. Радиоактивное загрязнение и прогноз состояния природных вод Беларуси / А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич, А. А. Петрович // Природные ресурсы. – 1997. – № 4. – С. 41–51.
31. Орадовская, А. Е. Санитарная охрана водозаборов подземных вод / А. Е. Орадовская, Н. Н. Лапшин. – М. : Недра, 1987. – 167 с.

References

1. *Strategiya obrasheniya s radioaktivnymi othodami Belorusskoj atomnoj elektrostancii*. [Strategy for managing radioactive waste of the Belarusian Nuclear Power Plant]. Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus', 2 iyunya 2015 g., № 460 // Nac. pravovoj Internet-portal RB, 06.06.2015, 5/40619, 7 p. URL: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=12551&p0=C21500460&p1=1&p5=0> (accessed April 14, 2026). (in Russian)
2. *Soveshchanie o rezul'tatah raboty BelAES, uvelichenii elektropotrebleniya i predlozheniyah o stroitel'stve novyh atomnyh moshchnostej*. [Meeting on the results of the work of the Belarusian NPP, increase in electricity consumption and proposals for the construction of new nuclear facilities] // Oficial'nyj internet-portal Prezidenta Respubliki Belarus'. URL: <https://president.gov.by/ru/events/sovesanie-o-rezul-tatah-raboty-belaes-uvelichenii-elektropotrebleniya-i-predlozheniyah-o-stroitel'stve-novyh-atomnyh-moshnostej> (accessed November 14, 2025). (in Russian)
3. Potapova E. S., Karankevich A. M. *Atom perspektiv. Razvitie yadernoj energetiki usilivaet ekonomiku Belarusi*. [An atom of perspective. The development of nuclear energy strengthens the economy of Belarus] // Oficial'nyj internet-portal Palaty predstavitelej Nacional'nogo sobraniya Respubliki Belarus'. URL: <https://house.gov.by/ru/interview-ru/view/atom-perspektiv-razvitie-yadernoj-energetiki-usilivaet-ekonomiku-belarusi-12573/> (accessed April 15, 2026). (in Russian)
4. *Obzor sostoyaniya yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti v Respublike Belarus' za 2022 god* [Review of the state of nuclear and radiation safety in the Republic of Belarus for 2022 // Internet portal of the Department of Nuclear and Radiation Safety of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus] // Internet-portal Departamenta po yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti Ministerstva po chrezvychajnym situacijam Respubliki Belarus'. URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/ff6/dfjims13b2tgwl9jkr2j1bw61tuosq/OBZOR_final.pdf (accessed April 14, 2026). (in Russian)
5. *Podhod k vyboru punkta razmeshcheniya i ploshchadki stroitel'stva specializirovannoj organizacii po obrashcheniyu s radioaktivnymi othodami* [An approach to choosing the location and construction site of a specialized radioactive waste management organization] / N. M. Shiryayeva [et al.]. – Minsk, Preprint / NAN Belarusi, Ob'ed. in-t energet. i yader. issled. Sosny; OIEYAI – 42, 2010, 62 p. (in Russian)
6. *Sostoyanie i perspektivy resheniya problemy snizheniya radioaktivnogo zagryazneniya ob'ektov dlya ekologicheskoy reabilitacii territorij posle katastrofy na CHernobyl'skoj AES i obespechenie bezopasnosti pri obrashchenii s radioaktivnymi othodami* / Skurat V. V. [i dr.] [The state and prospects of solving the problem of reducing radioactive contamination of facilities for environmental rehabilitation of territories after the Chernobyl disaster and ensuring safety in radioactive waste management] // Evropa – nash obshchij dom: Ekologicheskie aspekty. Plenarnye doklady mezhdunarodnoj nauch. konf. – Minsk, FTI NANB, 2000, pp. 249–261. (in Russian)
7. *Veroyatnostnaya ocenka dolgovremennoj bezopasnosti pripoverhnostnogo punkta zahoroneniya radioaktivnyh othodov* [Probabilistic assessment of the long-term safety of a near-surface radioactive waste disposal site] / N. V. Gorbacheva [i dr.] // Ohrana okruzhayushchej sredy i obrashchenie s radioaktivnymi othodami nauchno-promyshlennyh centrov. Vывод iz ekspluatatsii YAROO [] TRUDY Vtoroj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 60-letiyu FGUP "RADON", Sergiev Posad, 23–24 sentyabrya 2020: "Poligraf", 2020, pp. 31–35. (in Russian)

8. Kuz'mina, N. D. *Problemy obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti pri dolgovremennom centralizovannom hranenii radioaktivnykh othodov v Respublike Belarus'* [Problems of radiation safety in long-term centralized storage of radioactive waste in the Republic of Belarus] / N. D. Kuz'mina, M. L. Zhemzhurov // *Ohrana okruzhayushchej sredy i obrashchenie s radioaktivnymi othodami nauchno-promyshlennykh centrov. Vyvod iz ekspluatatsii YAROO. TRUDY Vtoroj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 60-letiyu FGUP "RADON".* – Sergiev Posad, 23-24 sentyabrya 2020. Sergiev Posad, 2020, pp. 77–80. (in Russian)
9. *Reshenie zadach ohrany podzemnykh vod na chislennykh modelyakh* [Solving the problems of groundwater protection using numerical models] / G. N. Genzel', N. F. Karachevcev, Konosavskij i dr. // pod red. V. A. Mironenko. Moscow, Nedra, 1992, 240 p. (in Russian)
10. Mironenko V. A., Mol'skij E. V., Rumynin V. G. *Izuchenie zagryazneniya podzemnykh vod v gornodobyvayushchih rayonah* [Study of groundwater pollution in mining areas]. Leningrad, Nedra Publ., 1988, 279 p. (in Russian)
11. Portal NAN Belarusi [sait]. URL: <https://nasb.gov.by/rus/news/15597/> (accessed April 14, 2026). (in Russian)
12. Zhoglo, V. G. *Chislennaya geofil'tracionnaya model' podzemnykh vod mezhdu rech'ya Viliya – Gozovka (Respublika Belarus')* [Numerical geofiltration model of groundwater between the Viliya and Gozovka rivers (Republic of Belarus)]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 113–125. (in Russian)
13. Kudel'skij A. V. [et al.]. *Podzemnye vody Ostroveckogo regiona Belarusi* [Groundwater of the Ostrovets region of Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2012, 101 p. (in Russian)
14. Zeegofer Yu. O. [et al.]. *Postoyanno dejstvuyushchie modeli gidrolitosfery territorij gorodskih aglomeracij (na primere Moskovskoj aglomeracii)* [Permanent models of the hydrolithosphere of the territories of urban agglomerations (on the example of the Moscow agglomeration)]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 198 p. (in Russian)
15. *Gidrogeodinamicheskie raschety na EVM* [Hydrogeodynamic computer calculations]: ucheb. posobie / pod red. R. S. SHtengelova. Moscow, Moscow State University Press, 1994, 335 p. (in Russian)
16. *Gidrogeologicheskoe prognozirovanie* [Hydrogeological forecasting]. Translation from English. M. G. Anderson and T. P. Bert (eds.). Moscow, Mir Publ., 1988, 736 p. (in Russian)
17. Shestakov V. M. *Dinamika podzemnykh vod* [Groundwater dynamics] : ucheb. dlya studentov vuzov. – 3-e izd. – Moscow, KDU Publ., 2009, 334 p. (in Russian)
18. Shestakov, V. M. *Dinamika podzemnykh vod* [Groundwater dynamics]. Moscow, Moscow University Press, 1973, 327 p. (in Russian)
19. Galkin, A. N. *Diffuzionno-osmoticheskie svoystva glinistyh gruntov Gomel'skogo promyshlennogo rajona* [Diffusion and Osmotic Properties of Clay Soils in the Gomel Industrial Region] : avtoref. dis. kand. geol.-min. nauk : 04.00.07 / MGU im. M. V. Lomonosova. Moscow, 1999, 22 p. (in Russian)
20. Driver, Dzh. *Geokhimiya prirodnykh vod* [Natural water geochemistry] / Dzh. Driver ; perevod s angl. Moscow, Mir Publ., 1985, 440 p. (in Russian)
21. Zhoglo, V. G. *Sistema chislennykh geofil'tracionnykh modelej verhnego etazha gidrolitosfery yugo-vostoka Respubliki Belarus'* [System of numerical geofiltration models of the upper level of the hydrolithosphere of the south-east of the Republic of Belarus]. Minsk, In-t geol. Nauk Publ., 2001, 176 p. (in Russian)
22. Kapyrin, I. V. *Raschetnyj kompleks GeRa dlya modelirovaniya processov geofil'tracii i geomigracii radionuklidov* [GeRa design complex for modeling the processes of geofiltration and geomigration of radionuclides] / I. V. Kapyrin, Yu. V. Vasilevskij, A. V. Rastorguev // *Gidrogeologiya segodnya i zavtra: nauka, obrazovanie i praktika : materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 60-letiyu osnovaniya kafedry gidrogeologii MGU im. M. V. Lomonosova*, Moscow, 22–24 maya 2013 g. Moscow, 2013, pp. 235–240. (in Russian)
23. Brovka, G. P. *Ocenka parametrov gidrodispersii i ee vliyaniya na konvektivno-diffuzionnyj perenos radioaktivnykh zagryaznenij v prirodnykh dispersnykh sredakh* [Evaluation of hydrodispersion parameters and its effect on convective-diffusion transfer of radioactive contamination in natural disperse media] / G. P. Brovka, I. N. Dorozhok // *Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi*, 2026, vol. 70, no. 1, pp. 71–77. (in Russian)
24. *Ocenka vozdeystviya na gruntovye vody ob'ektov hraneniya radioaktivnykh othodov po uproshchennoj tekhnologii na specpredpriyatii "Ekores"* [Assessment of the impact on groundwater of radioactive waste storage facilities using simplified technology at the Ekores special enterprise] / N. M. Shiryayeva [et al.]. – Minsk : Preprint / NAN Belarusi, Ob'ed. in-t energet. i yader, issled. Sosny; OIEYAI – 60, 2013, 48 p. (in Russian)
25. *Ocenka vozdeystviya na gruntovye vody hranilishch radioaktivnykh othodov, vypolnennyh po tipovomu proektu, na specpredpriyatii "Ekores"* [Assessment of the impact on groundwater of radioactive waste storage facilities performed according to a standard project at the Ekores special enterprise] / N. M. Shiryayeva [et al.]. Minsk, Preprint Publ. / NAN Belarusi, Ob'ed. in-t energet. i yader, issled. Sosny; OIEYAI-61, 2014, 36 p. (in Russian) (in Russian)
26. *Ocenka vliyaniya ob'ektov hraneniya radioaktivnykh othodov specpredpriyatia "Ekores" na kachestvo podzemnykh vod napornykh gorizontov, ispol'zuemykh dlya vodopol'zovaniya* [Assessment of the impact of radioactive waste storage facilities of the Ekores special enterprise on the quality of groundwater of pressure horizons used for water use] / N. M. Shiryayeva [et al.]. NAN Belarusi, Ob'ed. in-t energet. i yader, issled. Sosny; OIEYAI – 62. Minsk, Preprint Publ., 2014, 32 p. (in Russian)
27. Zhoglo, V. G. *Prognoz radiacionnogo sostoyaniya podzemnykh vod na vodozabore "Sozh" g. Gomelya* [Forecast of the radiation state of groundwater at the Sozh water intake in Gomel] / V. G. Zhoglo, A. F. Akulevich // *Nauchnye chteniya "Problemy ohrany geologicheskoy sredy": tezisy dokl. 1-j nauch.-prakt. konf., posvyashchennoj 90-letiyu so dnya razhdeniya akademika AN BSSR G. V. Bogomolova*, Minsk, 19–21 aprelya 1995 g.: otv. red. L. A. Demidovich, V. P. Klement'ev / Ministerstvo obrazovaniya i nauki Respubliki Belarus', Ministerstvo prirodnykh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus', Belorusskij gosudarstvennyj koncern "Belhimnefteprom". Minsk, 1995, pp. 81–82. (in Russian)

28. Akulevich, A. F. *Issledovanie radioaktivnogo zagryazneniya podzemnyh vod v rajone vodozabara "Sozh" g. Gomelya* [Study of radioactive contamination of groundwater near the Sozh water intake in Gomel] / A. F. Akulevich, V. G. Zhoglo, V. P. Il'in // *Poiski i osvoenie neftyanyh resursov Respubliki Belarus'*: Sb. nauch. tr. – Vyp. 2. – Gomel', BelNIPIneft' Publ., 1997, pp. 201–206. (in Russian)
29. Kudel'skij, A. V. *O radioaktivnom zagryaznenii prirodnyh vod i vodnoj migracii radionuklidov na yugo-vostoke Belorussii* [On radioactive contamination of natural waters and water migration of radionuclides in the south-east of Belarus] / A. V. Kudel'skij [et al.]. *Doklady AN BSSR*, 1990, vol. 34, no. 11, pp. 1039–1042. (in Russian)
30. Kudel'skij A. V., Pashkevich V. I., Petrovich A. A. *Radioaktivnoe zagryaznenie i prognoz sostoyaniya prirodnyh vod Belarusi* [Radioactive contamination and forecast of the state of natural waters of Belarus]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 1997, no. 4, pp. 41–51. (in Russian)
31. Oradovskaya A. E., Lapshin N. N. *Sanitarnaya ohrana vodozaborov podzemnyh vod* [Sanitary protection of ground-water intakes]. Moscow, Nedra Publ., 1987, 167 p. (in Russian)

Информация об авторе

Жогло Василий Гаверирович – доктор геолого-минералогических наук, доцент, главный научный сотрудник сектора гидрогеологии и гидроэкологии лаборатории региональной геологии и современной геодинамики Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: w.zhoglo50@yandex.ru

Information about the author

Vasily G. Zhoglo – D. Sc. (Geological and Mineralogical), Docent, Chief Researcher at the Hydrogeology and Hydroecology Sector of the Laboratory of Regional Geology and Modern Geodynamics, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: w.zhoglo50@yandex.ru