

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-110-130>

УДК 556.38(476.7)

Поступила в редакцию 31.03.2025
Received 31.03.2025

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ВОДОСБОРОВ РЕК ЛЕСНАЯ И МУХАВЕЦ

В. Г. Жогло

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Выполнено геомиграционное моделирование изменения качественного состояния подземных вод на территории междуречья Лесная – Мухавец в зоне влияния водозаборов г. Бреста. По результатам моделирования составлены прогнозные карты загрязнения подземных вод грунтового, палеоген-среднечетвертичного и оксфорд-сеноманского водоносных комплексов (ВК) на период от 5 до 100 лет при естественном режиме фильтрации подземных вод и в условиях работы централизованных водозаборов г. Бреста.

Показано, что в течение прогнозного периода загрязнению подвергаются грунтовый, палеоген-среднечетвертичный и оксфорд-сеноманский ВК. Негативному воздействию не подвергается верхнепротерозойский-нижнекембрийский ВК, входящий в зону замедленного водообмена.

Водозаборы г. Бреста не оказали значимого влияния на масштабы загрязнения подземных вод грунтового и палеоген-среднечетвертичного ВК. Основные изменения связаны с эксплуатируемым оксфорд-сеноманским ВК. Отбор подземных вод из этого комплекса в объеме 221,7 тыс. м³/сут увеличивает напорные градиенты потока и, соответственно, скорости движения подземных вод. В течение 100 лет прогнозный фронт загрязнения от свиноводческого комплекса «Западный» может достичь линии водозабора «Западный».

Полученные результаты моделирования представляют интерес для обоснования мероприятий по управлению состоянием подземных вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец.

Ключевые слова: геофильтрация; геомиграционная модель; источники загрязнения; схематизация процесса миграции; водосборы рек Кшна, Лесная и Мухавец; водозаборы г. Бреста; прогноз качества подземных вод.

Для цитирования. Жогло В. Г. Прогноз изменения качества подземных вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 110–130.

FORECAST OF CHANGES IN UNDERGROUND WATERS QUALITY ON THE TERRITORY OF THE WATER CATCHMENT AREA OF THE LESNAYA AND THE MUHOVETS RIVERS

V. G. Zhoglo

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

Abstract. The geo-migration modelling of the change in underground waters quality on the territory of Lesnaya-Muhovets interfluve in the zone of the water intake influence of Brest city has been done. According to the results of the modelling the forecast maps of the underground water pollution of ground, Paleogene-Middle Quaternary and Oxfordian-Cenomanian aquiferous water complexes (AWC) for the period from 5 up to 100 years during the natural regime of underground waters filtration and in the condition of the central water intake operation of Brest city have been created.

It has been established that temporary pollution migration in natural conditions is utterly slowly. The ground, Paleogene-Middle Quaternary and Oxfordian-Cenomanian AWC undergo to pollution during a forecasting period. Upper Proterozoic-Lower Cambrian AWC being in the zone of impaired water exchange does not undergo to a negative impact.

The water intakes of Brest city have not made a significant influence on the scopes of the underground waters pollution of the ground and Paleogene-Middle Quaternary AWC. The main changes connected to the exploited Oxfordian-Cenomanian AWC. Underground waters sampling from this complex in an amount of 221.7 thous. m³/day increases the pressure flow gradients and accordingly underground waters speed motion. During 100 years pollution forecast forefront from 'Zapadny' pig breeding complex can reach 'Zapadny' water intake line.

Obtained modelling results have interest for the grounding of arrangements management on underground waters condition on the territory of Lesnaya and Muhevets rivers water catchment area.

Keywords: geo-filtration; geo-migration model; pollution sources; migration process schematization; Kshna, Lesnaya and Muhevets rivers water catchment area; Brest city water intake; the forecast of underground waters quality.

For citation. Zhoglo V. G. Forecast of changes in underground waters quality on the territory of the water catchment area of the Lesnaya and the Muhevets rivers. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 110–130.

Введение. В настоящее время единственным надежным источником хозяйствственно-питьевого водоснабжения в Республике Беларусь остаются подземные воды (ПВ). Пресные ПВ имеют практически повсеместное распространение и по сравнению с поверхностными водами значительно лучше защищены от разнообразных источников загрязнения. При длительном отсутствии атмосферных осадков существование всех поверхностных водоисточников поддерживается за счет их питания ПВ. Таким образом, ПВ Республики Беларусь являются стратегически важным ресурсом, имеющим экологическую, социальную и экономическую значимость.

Хозяйственная деятельность человека сконцентрирована вокруг населенных пунктов, к ним привязаны как места жительства людей, так и значительная часть производственных мощностей. Исходя из чисто экономических соображений, вблизи городов и других поселений людей ведутся поиски, разведка и оборудование источников водоснабжения, размещаются отходы производства и потребления.

Соседство источников водоснабжения и мест хранения отходов, являющихся непрерывно действующим поставщиком загрязняющих веществ, обуславливает постоянную актуальность задачи прогноза изменения качественного состояния ПВ как во времени, так и в пространстве. Временной фактор важен в связи с тем, что поиски и разведка месторождений пресных ПВ, пригодных для хозяйствственно-питьевого водоснабжения, строительство на их базе водозаборов, прокладка водопроводов и других инженерных сетей требуют значительных затрат времени. Оборудование новых водозаборов и инженерных сетей связано также с большими материальными затратами.

Процессы миграции загрязняющих веществ в ПВ протекают крайне медленно, поэтому краткосрочные прогнозы влияния источников загрязнения на качество ПВ являются малоинформационными. 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 прогнозные оценки влияния водорастворимых загрязняющих веществ на качество ПВ. Особую актуальность имеют долгосрочные прогнозы изменения качественного состояния ПВ в связи с сохранением источников хозяйствственно-питьевого водоснабжения для будущих поколений.

Повышенная сложность процессов миграции и 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 и развитостью математического обеспечения численных расчетов [1, с. 3]. Еще в 1980-е годы В. А. Мироненко, выдающийся российский (и советский) гидрогеолог, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, отмечал, что численное моделирование превратилось в своего рода символ передового научного подхода, в важнейший показатель качества проведенного исследования [2, с. 3]. Данное заключение профессора В. А. Мироненко не потеряло своей актуальности до настоящего времени. Тогда же В. А. Мироненко и В. Г. Румынин констатировали, 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 водоохраных 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» [3, с. 70].

Объект исследования – ПВ зон активного и замедленного водообмена на территории водозаборов рек Лесная и Мухавец от уровенной поверхности грунтовых вод (ГВ) до подошвы зоны трещиноватости кристаллического фундамента. Характеристика геологического строения и гидрогеологических условий водозаборов рек Лесная и Мухавец применительно к цели нашего исследования дана в работе [4].

Цель работы – осуществить прогноз изменения качества ПВ, обусловленного воздействием реальных источников загрязнения на водосборах рек Лесная и Мухавец в зоне влияния водозаборов г. Бреста.

Основные задачи: 1) создание численной модели миграции ПВ в междуречье Западный Буг – Лесная – Мухавец; 2) долгосрочный прогноз изменения качества ПВ; 3) оценка проблем, затрудняющих надежный прогноз изменения качества ПВ на длительную перспективу.

Методический подход к обоснованию расчетных схем миграции загрязнений в подземных водах. Как отмечают авторы работы [3, с. 72–75], «...решающую роль при построении расчетных моделей миграции, на базе которых осуществляются гидрохимическое прогнозирование, планирование и интерпретация режимных наблюдений, играет миграционная схематизация процессов и условий массопереноса в водоносных комплексах (ВК). При этом можно выделить два этапа: 1) фильтрационная схематизация условий миграции и 2) схематизация процесса массопереноса (собственно миграционная схематизация). Ограничность информации о фильтрационном поле является главной причиной, заставляющей проводить миграционную схематизацию на базе упрощенных моделей».

Основные аспекты миграционной схематизации сводятся к следующему [3, с. 75–76]: «1) схематизация влияния процессов массопереноса на расчетную схему фильтрации; 2) схематизация физико-химического взаимодействия ПВ с горными породами, а также физико-химических превращений, протекающих непосредственно в подземных растворах; 3) выявление относительной значимости отдельных механизмов конвективно-дисперсионного переноса; 4) обоснование целесообразных уровней рассмотрения миграционных процессов в гетерогенных ВК – с анализом возможностей сведения гетерогенных комплексов к квазигомогенным; 5) схематизация структуры миграционного потока; 6) схематизация граничных условий миграции; 7) схематизация развития миграционного процесса во времени. Схематизация влияния массопереноса на расчетную схему фильтрации должна исходить в первую очередь из оценки возможного влияния мигрирующих компонентов на плотность и в меньшей степени вязкость ПВ. Если изменения этих показателей пренебрежимо малы, то, как правило, фильтрационная часть миграционной задачи может рассматриваться обособленно от массопереноса».

При схематизации физико-химических процессов общие допущения, традиционные для гидродинамической теории миграции, сводятся к следующим положениям [3, с. 76–77]: «1) термодинамические условия – априорно заданы независимо от миграционного процесса (чаще всего считаются постоянными); 2) миграция каждого из компонентов рассматривается обособленно, без учета взаимного их влияния – и в растворе, и на минеральной фазе; 3) хотя для пластовых (особенно загрязненных) растворов характерно многообразие химических состояний содержащихся в них элементов, все оценки проводятся лишь для превалирующих миграционных форм с известными термодинамическими параметрами».

Из важнейших упрощающих предпосылок по поводу межфазового физико-химического взаимодействия ПВ с горными породами выделяются следующие [3, с. 77–78]: «1) пренебрежение кинетикой реакций; 2) аппроксимация зависимостей интенсивности реакций от концентраций соответствующих компонентов изотермами обмена. Реакции, протекающие непосредственно в подземном растворе (деструкция, радиоактивный распад и др.), обычно носят ярко выраженный кинетический характер. Как правило, удовлетворительная аппроксимация достигается в рамках моделей физико-химической кинетики первого порядка; в этом случае реакции преобразования растворов в пласте учитываются единственным показателем – обобщенным коэффициентом деструкции (распада)».

Схематизация миграционного процесса в гетерогенных ВК, как подчеркивают авторы [3, с. 78–79], требует «последовательного рассмотрения сменяющих друг друга в пространстве и во времени режимов массопереноса, в который на первый план выходят различные механизмы миграции (конвекция, механическая дисперсия, молекулярная диффузия, физико-химические взаимодействия). С этой точки зрения речь идет о многоуровневом протекании миграционного процесса, находящем свое формально-математическое отражение в описании различных стадий процесса различными моделями».

На основе рекомендаций [3], изложенных выше, нами проведена геофильтрационная и геомиграционная схематизация геолого-гидрогеологических условий фильтрации и миграции ПВ в объеме зон активного и замедленного водообмена водосборов рек Лесная и Мухавец.

Геофильтрационная схема условий миграции подземных вод. В качестве геофильтрационной основы для численной геомиграционной модели междуречья Западный Буг – Лесная – Мухавец первоначально использовали численную геофильтрационную модель водосборов рек Лесная и Мухавец (рабочее название модели – «LiM»). Детальная характеристика модели «LiM» и результаты решения задач по количественной оценке условий формирования инфильтрационного водообмена и естественных ресурсов ПВ в бассейнах рек Лесная и Мухавец приведены в статье [4]. Здесь следует отметить, что сеточная область

модели «LiM» является слишком грубой (шаг сетки равен 1000 м), поэтому целесообразность ее использования в качестве детальной геофiltрационной основы условий миграции ПВ выглядит сомнительной. Для получения представительных результатов моделирования желательно, чтобы шаг сетки геомиграционной модели был уменьшен в 3–5 раз.

С учетом имеющихся фактических данных по водосборам рек Лесная и Мухавец, а также технических возможностей вычислительных программ, нами создана детальная геофiltрационная модель (рабочее название – «ML-Mf»), на которой воспроизведена территория, ограниченная на западе руслом реки Западный Буг, на севере – руслом реки Лесная, на юге и востоке – руслом реки Мухавец (рис. 1). Таким образом, модель «ML-Mf» является крупномасштабной врезкой в региональную модель «LiM».

Увеличение детальности модели «ML-Mf» по сравнению с региональной моделью «LiM» достигнуто за счет сокращения шага сеточной области в 3 раза (с 1000 м до 333,33 м) и уменьшения размеров моделируемой области. Гидрогеологические параметры и прочие характеристики геофiltрационной модели «ML-Mf» не изменились, т. е. сохранены количественные значения всех параметров, принятых в региональной модели «LiM».

В разрезе исследуемой области выделены четыре водоносных пласта (комплекса) и три разделяющих слоя [4]:

1-й водоносный пласт – водно-ледниковые, аллювиальные и озерно-болотные отложения, залегающие на днепровской морене;

1-й разделяющий слой – супеси и суглинки днепровской морены;

2-й водоносный пласт – песчаные отложения березинско-днепровского и палеоген-неогенового возраста;

2-й разделяющий слой – мергельно-меловая толща верхнего мела;

3-й водоносный пласт – пески сеноманского возраста и трещиноватые кавернозные известняки оксфордского яруса верхней юры;

3-й разделяющий слой – толща слабопроницаемых отложений мощностью 600–800 м от кембрийских «синих глин» до юры включительно;

4-й водоносный пласт – трещиноватая часть пород кристаллического фундамента и осадочные образования верхнего протерозоя.

Верхней и нижней границами моделируемой области являются уровенная поверхность ГВ и подошва зоны трещиноватости кристаллического фундамента соответственно. Реки Лесная, Лесная Левая, Лесная Правая, Мухавец, их притоки и мелиоративные каналы воспроизведены как внутренние границы 3-го рода. В модели «ML-Mf» созданы также три информационных слоя: «абсолютные отметки поверхности земли», «поверхностные воды», «инфилтрационное питание».

Региональная модель «LiM» и модель-врезка «ML-Mf» согласованы по условиям дискретизации исследуемого объекта, т. е. в области пересечения фрагментов модель более мелкого масштаба включает все сходственные точки модели более крупного масштаба. Использование моделей, согласованных по дискретизации исследуемой области, является важным средством повышения точности моделирования, так как в этом случае уменьшаются ошибки междуузловой интерполяции сеточных функций. В нашем случае модели «LiM» и «ML-Mf» согласовываются между собой по дискретизации пространства таким образом, чтобы центры всех блоков (ячеек) модели «LiM» совпадали в сходственных точках с центрами расчетных блоков (ячеек) модели «ML-Mf». В центрах промежуточных ячеек, находящихся между сходственными точками, количественные значения напоров ПВ и гидрогеологических параметров определены путем интерполяции с помощью программы «SURFER».

Размеры территории, воспроизводимой на модели «ML-Mf», составляют 77,3 км с запада на восток (по оси X) и 43,3 км с юга на север (по оси Y). При шаге сеточной области 333,33 м получена размерность модели «ML-Mf» в плане: 232 расчетных блока по оси X и 130° – по оси Y.

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 расчеты переноса загрязнения производятся, прежде всего, на основе представления поля скоростей потока. Учитывая медленность процессов переноса, обычно допустимо для их расчета рассматривать геофiltрационный поток как стационарный (квазистационарный).

Значительное влияние на процессы переноса загрязнения оказывает профильная фильтрационная неоднородность потока по проницаемости, которая обусловливается в осадочных породах их слоистостью.

Существуют два принципиально различных метода учета такой неоднородности: непосредственной реализации профиля проницаемости при расчетах распределения скоростей переноса по мощности потока [5, с. 275] или опосредованного учета профильной неоднородности в модели конвективно-дисперсионного переноса [3, с. 84–85], при котором определяются средние по глубине потока содержания мигрантов, а расчетные значения коэффициента дисперсии находятся по данным натурных наблюдений в аналогичных условиях.

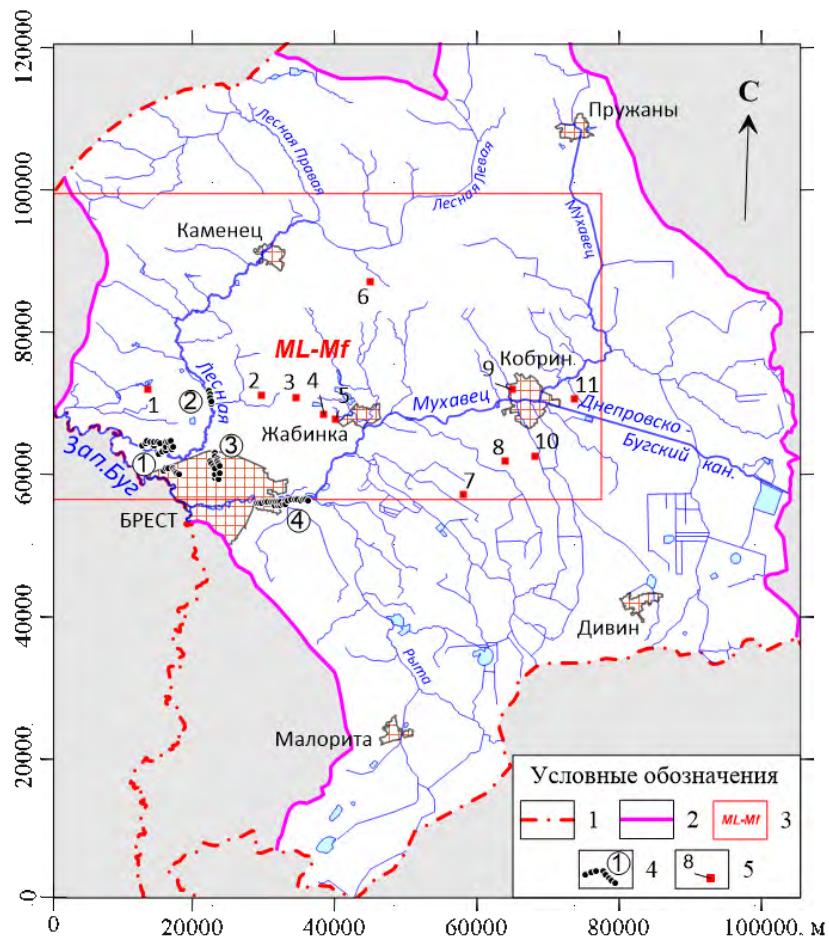


Рис. 1. Соотношение моделей «LiM» и «ML-Mf» в плане:

- 1 – государственная граница Республики Беларусь; 2 – граница бассейна р. Западный Буг;
- 3 – внешние контуры модели «ML-Mf»; 4 – водозаборы г. Бреста (1 – Западный; 2 – Северный; 3 – Граевский; 4 – Мухавецкий); 5 – объекты локального мониторинга (1 – свиноводческий комплекс «Западный»; 2 – полигон ТКО «Омелено»; 3 – полигон ТКО «Жабинка»; 4 – полигон ТКО «Саки»; 5 – поля фильтрации «Жабинковский сахарный завод»); 6 – полигон ТКО «Кукольчицы»; 7 – свиноводческий комплекс «Жабинковский ККЗ»; 8 – полигон ТКО «Такashi»; 9 – Кобринская птицефабрика; 10 – животноводческий комплекс «Хидры»; 11 – поля фильтрации «Залесье»)

Fig. 1. ‘LiM’ and ‘ML-Mf’ models correlation in a plan:

- 1 – the country border of the Republic of Belarus; 2 – the basin border of the Western Bug river;
- 3 – ‘ML-Mf’ outer contour model; 4 – Brest city water intakes (1 – Western; 2 – Northern; 3 – Graevsky; 4 – Muhavetsky); 5 – local monitoring objects (1 – ‘Zapadny’ pig breeding complex; 2 – ‘Omelino’ SMW landfill; 3 – ‘Zhabinka’ SMW landfill; 4 – ‘Saki’ SMW landfill; 5 – JSC “Zhabinkovsky sugar factory” filtration fields); 6 – ‘Kukolchitsy’ SMW landfill; 7 – ‘Zhabinkovsky FM’ pig breeding complex; 8 – ‘Takashi’ SMW landfill; 9 – Kobrin poultry farm; 10 –‘Hidry’ livestock complex; 11 – ‘Zalesje’ filtration fields)

В созданных нами геофильтрационных моделях использован первый путь – непосредственной реализации профильной неоднородности пород по проницаемости, который представляется более предпочтительным, поскольку позволяет дать более конкретную оценку влияния профильной неоднородности на распространение загрязняющих мигрантов по глубине потока, что особенно важно при изучении миграции загрязнения в потоках большой мощности.

После воспроизведения на модели-врезке «ML-Mf» всех параметров и элементов потока выполнено моделирование фильтрации ПВ в естественных условиях (работа гидротехнических сооружений, водозаборов, дренажей не моделировалась).

Схематизация процесса массопереноса. 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 нескольких подходов: 1) использования наиболее жесткой расчетной схемы, гарантирующей определенный инженерный запас в расчетах; 2) дальнейшего уточнения прогнозных оценок путем более полного учета в расчетных схемах пространственной изменчивости геофильтрационных и геомиграционных параметров, форм переноса вещества и физико-химических взаимодействий между раствором и породой.

На данном этапе исследований миграция загрязняющего вещества из расчетного блока с источником загрязнения рассчитывается путем решения прогнозной задачи на модели в соответствии с пространственной структурой потока грунтовых и межпластовых вод и принятыми к расчету миграционными параметрами.

Источники загрязнения. В число источников загрязнения включены пункты наблюдений локального мониторинга ПВ, находящихся на территории, воспроизведенной на геомиграционной модели междууречья Лесная – Мухавец (рабочее название «ML-Мм»). Эти пункты мониторинга утверждены постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 11.01.2017 № 5. Их местоположение показано на рис. 1 (всего 11 объектов):

1. *Свиноводческий комплекс «Западный».* Расположен в Брестском районе, в 2,0 км на северо-запад от д. Мотыкалы. Загрязнение животноводческими стоками (нитраты, хлориды, сульфаты, ионы натрия, калия).

2. *Полигон твердых коммунальных отходов (ТКО) «Омелино».* Расположен в Брестском районе, в 1,3 км юго-восточнее д. Омелино. Загрязнение тяжелыми металлами (цинк, молибден, кадмий), хлоридами, нитратами, сульфатами и органическими соединениями.

3. *Полигон ТКО «Жабинка».* Расположен в Жабинковском районе, в 10,0 км от г. Жабинка по дороге на Большие Мотыкалы, в 1,2 км от дороги Жабинка – Мотыкалы на северо-восток. Загрязнение тяжелыми металлами (цинк, молибден, кадмий), хлоридами, нитратами, сульфатами и органическими соединениями.

4. *Полигон ТКО «Саки».* Расположен в Жабинковском районе, в 4,0 км к западу от г. Жабинка, в 350 м на юго-запад от д. Саки. Загрязнение тяжелыми металлами (цинк, молибден, кадмий), хлоридами, нитратами, сульфатами и органическими соединениями.

5. *Поля фильтрации «Жабинковский сахарный завод».* Расположены в Жабинковском районе, в 2,0 км к юго-западу от г. Жабинка, в 1,3 км на юго-восток от д. Саки. Загрязнение азотом аммонийным, нитритами, нитратами, фосфатами, хлоридами, сульфатами, хромом, железом, марганцем, алюминием, медью, цинком, никелем, свинцом, кадмием, ртутью, нефтепродуктами, синтетическими поверхностно-активными веществами, фенолами.

6. *Полигон ТКО «Кукольчицы».* Расположен в Каменецком районе, в 17,5 км от г. Каменец на юго-восток и в 1,1 км от д. Кукольчицы на юго-запад.

7. *Свиноводческий комплекс «Жабинковский ККЗ».* Расположен в Жабинковском районе, в 1,9 км на северо-восток от д. Сычёво. Загрязнение животноводческими стоками (нитраты, хлориды, сульфаты, ионы натрия, калия).

8. *Полигон ТКО «Такаши».* Расположен в Кобринском районе, в 9,0 км к югу от г. Кобрин, в 1,1 км западнее д. Каташи. Загрязнение тяжелыми металлами (цинк, молибден, кадмий), хлоридами, нитратами, сульфатами и органическими соединениями.

9. *Кобринская птицефабрика.* Расположена в западной части г. Кобрин. Загрязнение ГВ аммонийным азотом, нитратами, сульфатами, ионами натрия, калия.

10. *Животноводческий комплекс «Хидры».* Расположен в Кобринском районе, в 800 м на юго-запад от д. Хидры. Загрязнение ГВ хлоридами, нитратами, сульфатами, ионами натрия, калия.

11. Поля фильтрации «Залесье». Расположены в Кобринском районе, в 1,8 км к юго-западу от д. Залесье. Загрязнение ГВ хлоридами, нитратами, сульфатами, ионами натрия, калия.

Краткая характеристика численной геомиграционной модели междуречья Лесная – Мухавец.

Геомиграционная модель междуречья Лесная – Мухавец создана на основе геофильтрационной модели «ML-Mf». Для моделирования миграции загрязняющих веществ в ПВ нами использована вычислительная программа MTS (Mass Transport Simulation – Моделирование массопереноса в подземных водах; разработчик – А. М. Свищев, ЗАО «Геолинк»). Программа MTS предназначена для моделирования переноса в воде химического компонента и расчета распределения концентрации в пространстве и времени. Предполагается, что изменение концентрации в системе может быть вызвано следующими процессами:

- конвективным переносом, в котором растворенные химические компоненты движутся вместе с фильтрационным потоком;

- гидродинамической дисперсией, при которой молекулярная диффузия и неравномерность скоростей фильтрации в отдельных порах или системе вызывают рассеяние вещества;

- источниками воды и вещества;

- реакциями, в ходе которых некоторое количество растворенных химических веществ может быть добавлено или извлечено из ПВ в результате физико-химических реакций в водной фазе или в системе «вода – порода».

Моделирование задач массопереноса в ПВ осуществляется на основе численного решения классического уравнения конвективной диффузии. Решение осуществляется методом характеристик, теория которого изложена в работах [1, 6, 7] и др.

При геомиграционном моделировании изменения качества ПВ в междуречье Лесная – Мухавец нами принималось, что перенос мигранта в водоносных пластах происходит конвективно-дисперсионным путем. Коэффициенты дисперсивности водонасыщенных песков приняты по литературным источникам [5, 8–10] одинаковыми для грунтового и межпластовых водоносных горизонтов: коэффициент продольной дисперсии – 0,001 м; коэффициент поперечной дисперсии – 0,0001 м. Процессы сорбции не учтены. Наиболее характерные для исследуемого района значения активной пористости водоносных горизонтов и разделяющих слоев приняты по аналогии с Гомельским регионом [10, 11]: грунтовый водоносный горизонт – 0,10; палеоген-среднечетвертичный водоносный горизонт – 0,13; оксфорд-сеноманский водоносный горизонт – 0,15. Мощности водоносных горизонтов и разделяющих пластов заданы по данным государственного предприятия «НПЦ по геологии».

Концентрация мигранта (загрязняющих веществ) во всех источниках загрязнения, заданных на модели «ML-Mm», принята равной 100 условных единиц (100 %). Мигрант поступает в грунтовый водоносный горизонт с техногенным инфильтрационным питанием, в котором концентрация мигранта принимается равной 100 условных единиц. Величина (интенсивность) техногенного питания принята равной 200 мм/год плюс интенсивность инфильтрационного питания ГВ в естественных условиях. Столь значительное увеличение питания ГВ на площади размещения источников загрязнения объясняется частичным перехватом атмосферных осадков и подачей жидких стоков на поверхность объектов локального мониторинга.

В качестве мигранта может рассматриваться любой консервативный элемент (наиболее характерными являются хлор-, нитрат- и сульфат-ионы). Поваренная соль, сульфаты и нитраты – наиболее характерные консервативные загрязняющие вещества, которые обычно хранятся на поверхности земли или в зоне аэрации (солеотвалы ОАО «Беларуськалий», отвалы фосфогипса ОАО «Гомельский химический завод», животноводческие комплексы, поля фильтрации).

Прогноз изменения качества подземных вод в условиях естественного режима фильтрации.

При решении прогнозных задач на модели «ML-Mm» за основу взято поле скоростей ПВ при естественном режиме фильтрации, полученное в результате решения геофильтрационных задач на модели «ML-Mf» (работа гидротехнических сооружений, водозаборов, дренажей не моделировалась). Задача решена в стационарной постановке. Моделирование переноса загрязнений выполнено на 100 лет с временным шагом $\Delta t = 5$ лет. Решение получено на моменты времени $t = 5, 10, \dots, 100$ лет. Для первых 25 лет расчеты проведены с временным шагом $\Delta t = 1$ год. Все источники загрязнения включаются одновременно.

По результатам моделирования получены расчетные значения концентрации мигранта во всех водоносных горизонтах по всему полю моделируемой области на заданные моменты времени. В обобщенном виде результаты моделирования приведены в табл. 1. В ней по каждому ВК показана площадь ареала загрязнения с концентрацией мигранта более 5,0 %, а также максимальная и средняя концентрация мигранта в ареале загрязнения на каждом расчетном моменте времени (временном интервале).

Таблица 1. Обобщенные прогнозные данные по изменению качества подземных вод в зоне влияния источников загрязнения (без учета влияния гидротехнических сооружений)

Table 1. Generalized forecast data on the quality change of underground waters in the zones of pollution sources influence (do not taking into account hydro-technical buildings influence)

Прогнозный период, лет	Водоносный комплекс	Количество расчетных блоков модели с $C > 5,0 \%$	Площадь загрязнения с $C > 5,0 \%, \text{км}^2$	Концентрация мигранта $C, \%$	
				средняя	максимальная
0–5	Грунтовый	76	8,43	24,46	59,40
	Палеоген-среднечетвертичный	24	2,66	7,92	14,56
	Оксфорд-сеноманский	—	—	—	—
0–10	Грунтовый	124	13,75	28,91	78,76
	Палеоген-среднечетвертичный	49	5,43	16,02	36,31
	Оксфорд-сеноманский	—	—	—	—
0–25	Грунтовый	245	27,17	30,41	96,92
	Палеоген-среднечетвертичный	151	16,74	20,38	70,83
	Оксфорд-сеноманский	4	0,44	5,21	5,28
0–50	Грунтовый	335	37,15	29,99	99,93
	Палеоген-среднечетвертичный	269	29,83	25,38	96,13
	Оксфорд-сеноманский	37	4,10	7,72	12,69
0–100	Грунтовый	428	47,46	26,82	100,00
	Палеоген-среднечетвертичный	474	52,56	23,03	99,91
	Оксфорд-сеноманский	126	13,97	9,12	24,55

Динамика роста площади ареалов загрязнения подземных вод. На начальный момент времени ($t = 0$) суммарная площадь земель под источниками загрязнения на модели «ML-Мм» равна $2,9 \text{ км}^2$. Через 5 лет общая площадь ареалов загрязнения ПВ грунтового ВК (по изолинии концентрации мигранта $5,0 \%$), включая площадь самих объектов локального мониторинга, составляет $8,44 \text{ км}^2$, а через 100 лет она достигает $47,5 \text{ км}^2$, т. е. увеличивается в 5,6 раза, или в 16,5 раза в сравнении с площадью самих источников загрязнения. Примерно такая же динамика характерна и для межпластовых ВК (рис. 2).

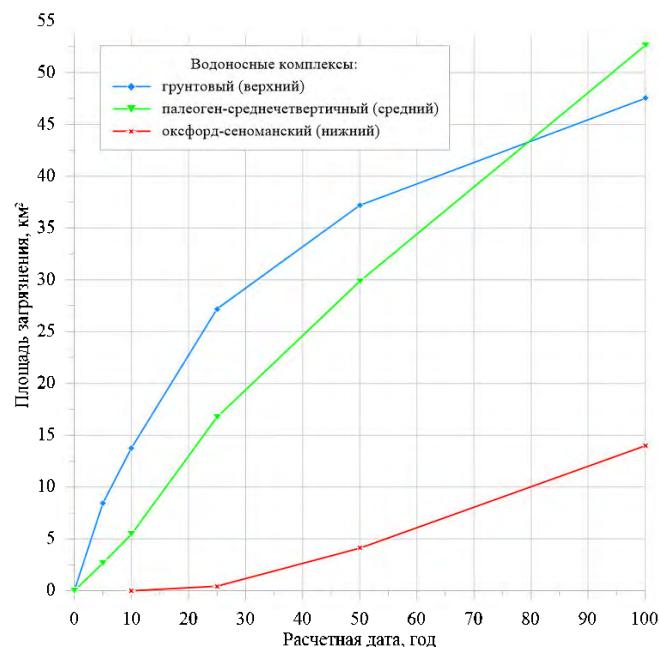


Рис. 2. Динамика роста площади ареалов загрязнения подземных вод грунтового, палеоген-среднечетвертичного и оксфорд-сеноманского водоносного комплекса (по изолинии $C = 5 \%$)

Fig. 2. Dynamics in the area growth of the pollution aureoles of the underground waters of ground, Paleogene-Middle Quaternary and Oxfordian-Cenomanian aquiferous water complexes (according to the isoline of $C = 5 \%$)

По результатам расчетов составлены прогнозные карты загрязнения ПВ грунтового, палеоген-среднечетвертичного и оксфорд-сеноманского ВК на $t = 100$ лет (рис. 3).

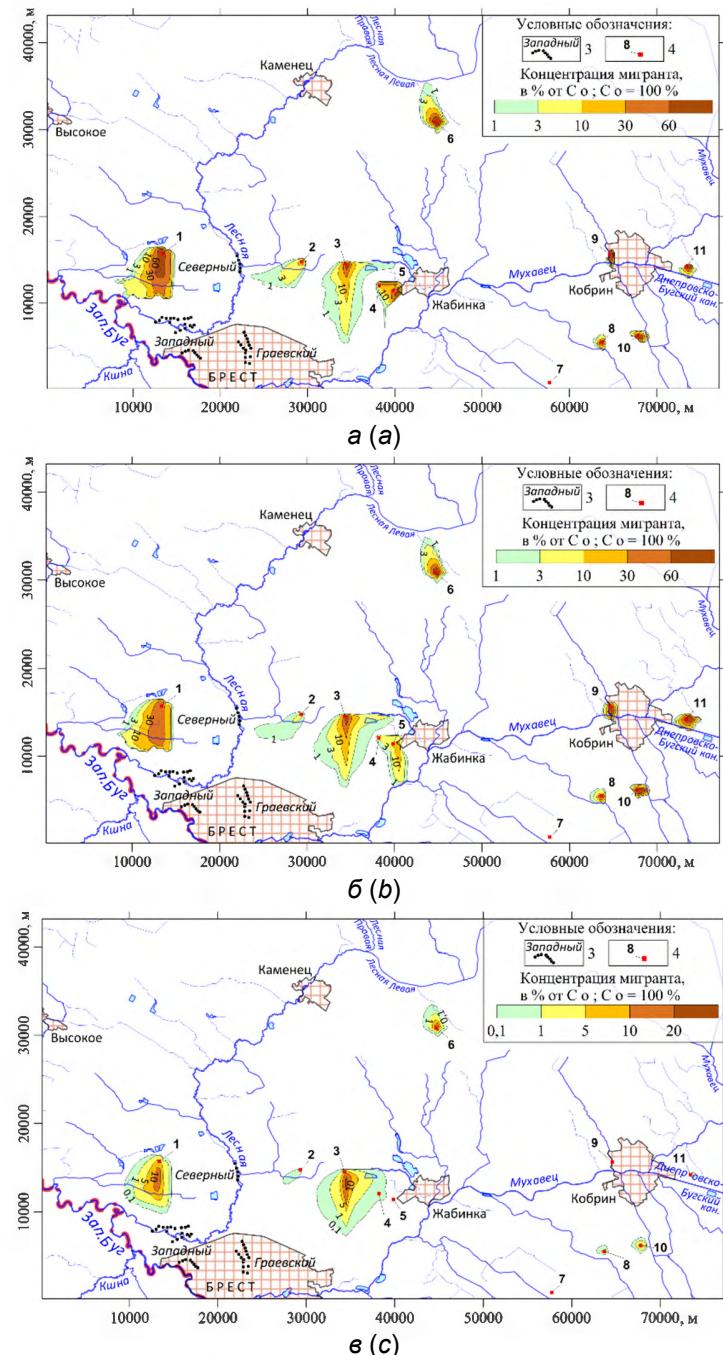


Рис. 3. Прогнозные карты загрязнения ПВ грунтового (а), палеоген-среднечетвертичного (б) и оксфорд-сеноманского (в) водоносных комплексов на объектах локального мониторинга в бассейнах рек Лесная и Мухавец на прогнозный период 100 лет

Fig. 3. The forecast maps of the underground waters pollution of ground (a), Paleogene-Middle Quaternary (b) and Oxfordian-Cenomanian (c) aquiferous water complexes on the local object monitoring of Lesnaya and Muhavets river basins on forecast period of 100 years

Анализ приведенных прогнозных карт показывает, что миграция загрязнений во времени идет крайне медленно. В течение прогнозного периода (100 лет) загрязнению подвергаются грунтовый, палеоген-средне-четвертичный и оксфорд-сеноманский ВК. Верхнепротерозойский-нижнекембрийский ВК, входящий в зону замедленного водообмена, загрязнению не подвергается. Расчетная концентрация мигранта в этом комплексе через 100 лет не превышает 0,003 % от его концентрации в источниках загрязнения.

Прогноз изменения качества подземных вод при нарушенном режиме фильтрации. Выше изложены результаты, полученные нами по миграции загрязняющих веществ в естественном потоке ПВ между речьми Лесная – Мухавец, т. е. в потоке, пространственная структура которого не нарушена работой водозаборов, дренажей и других гидротехнических сооружений. Известно, что загрязнение, как правило, перемещается туда и так, куда и как течет вода [12]. А гидротехнические сооружения, в особенности централизованные водозаборы, очень сильно влияют на пространственную структуру потоков ПВ и скорости их движения. По состоянию на 01.01.2015 только для хозяйствственно-питьевого водоснабжения г. Бреста отбирались около 65 500 м³/сут воды из подземных источников (по данным филиала «БКГРЭ» государственного предприятия «НПЦ по геологии»). Для учета данного фактора в прогнозных оценках необходимо воспроизвести на геофильтрационной модели работу водозаборов. Но главная проблема состоит в том, что г. Брест и все брестские водозаборы находятся вблизи государственной границы Республики Беларусь с Польшей, поэтому на модели следует воссоздать подземную гидросферу территории Польши в пределах, как минимум, радиуса влияния водозаборов. Тогда корректность решения миграционных задач, направленных на оценку и прогноз качества пресных ПВ, значительно повысится. Для решения возникшей проблемы необходимо расширить ранее созданную геофильтрационную модель «LiM» в западном направлении на 30–40 км, т. е. на расстояние, превышающее радиус влияния водозаборов г. Бреста.

Краткая характеристика численной геофильтрационной модели водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец. В районе г. Бреста в р. Западный Буг впадает р. Кшна, водосбор которой полностью находится на территории Польши. Кшна (польск. Krzna) – река в Польше, левый приток Западного Буга. Протекает в Бельском повете Люблинского воеводства. Длина реки – 120 км. Площадь водосбора – 3353 км². Кшна образуется на юго-западной окраине города Мендзыжец-Подляски слиянием небольших рек Южная Кшна и Северная Кшна. Река течет на северо-восток по Западному Полесью, долина частично заболочена, русло сильно извилистое, частично спрямлено гидрологическими работами. Крупнейший населенный пункт на реке – город Бяла-Подляска.

Территория водосбора р. Кшна и часть бассейна р. Западный Буг севернее р. Кшна (рис. 4) включены нами в моделируемую область создаваемой геофильтрационной модели (рабочее название модели – «KLiM» – по первым буквам рек, водосборы которых составляют основную часть моделируемой области). В целом ранее созданная геофильтрационная модель «LiM» расширяется в западном направлении (по оси X) на 50 км. По оси Y (с юга на север) сохраняются размеры модели «LiM». Таким образом, размеры модели «KLiM» в плане составляют 156 км×121 км (156 блоков по оси X и 121 – по оси Y).

В вертикальном разрезе сохраняется структура моделей «LiM» и «ML-Mf». Всего задано четыре водоносных пласта и три разделяющих слоя. В численной геофильтрационной модели (ЧГФМ) водосборов Кшна, Лесная и Мухавец сохранены также информационные слои «абсолютные отметки поверхности земли», «поверхностные воды», «инфилтратационное питание».

Слой «абсолютные отметки поверхности земли» (рис. 5) предназначен для вычисления глубин залегания уровней ГВ. На рис. 5 цветными сплошными линиями показаны горизонтали, имеющие абсолютные отметки 130, 140, 150, 160 и 175 м.

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 «инфилтратационное 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.

В исходной ЧГФМ «KLiM» все информационные и расчетные пласти и слои имеют повсеместное распространение. Проводимости ВК и коэффициенты перетока слабопроницаемых слоев определены с учетом изменения мощностей основных стратиграфических подразделений на основе структурных карт, приведенных в опубликованных и фондовых работах государственного предприятия «НПЦ по геологии» и НАН Беларуси.

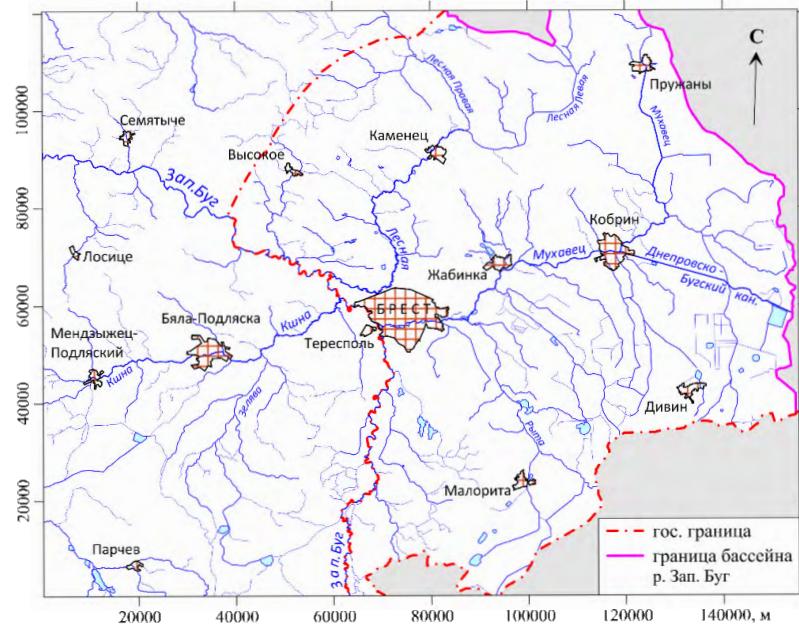


Рис. 4. Гидрографическая сеть водосборов рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающих территорий

Fig. 4. The hydrographical network of Kshna, Lesnaya, Muhowets river water catchment areas and the territories nearby

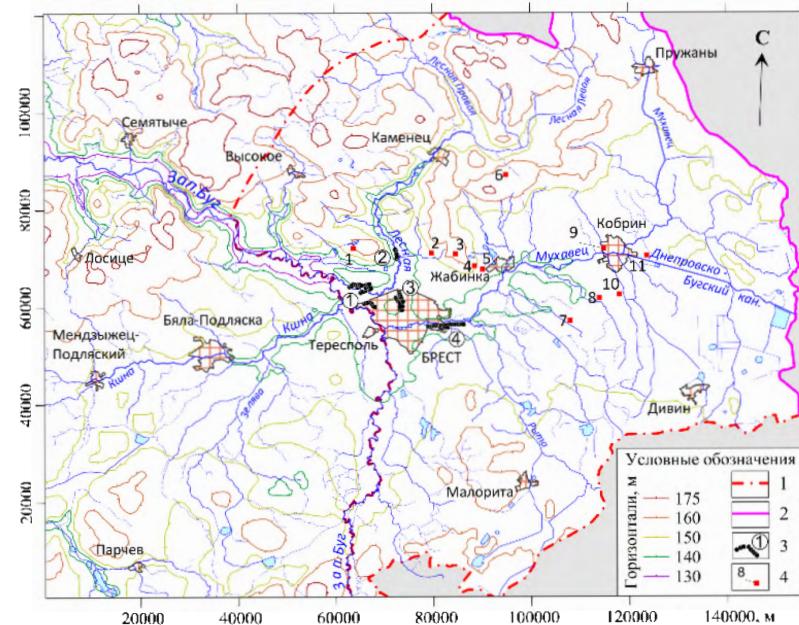


Рис. 5. Рельеф водосборов рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающих территорий:
1 – государственная граница Республики Беларусь; 2 – граница бассейна р. Западный Буг;
3 – водозаборы г. Бреста; 4 – объекты локального мониторинга;
см. детализацию условных обозначений 3 и 4 на рис. 1

Fig. 5. The relieve of the Kshna, the Lesnaya, the Muhowets rivers and the territories nearby:
1 – the country border of the Republic of Belarus; 2 – the border of Western Bug river basin;
3 – Brest city water intakes; 4 – local monitoring objects; see the symbols specification of 3 and 4 on fig. 1

Гидродинамические условия на границах модели «KLIM». Верхней границей области фильтрации является уровенная поверхность ГВ. По белорусской части исследуемого объекта использована карта гидроизогипс территории водосборов рек Лесная и Мухавец. Схема гидроизогипс для территории Польши построена по материалам из интернет-источников (рис. 6). Ее корректировка и согласование с поверхностными водотоками выполнена при калибрации модели «KLIM».

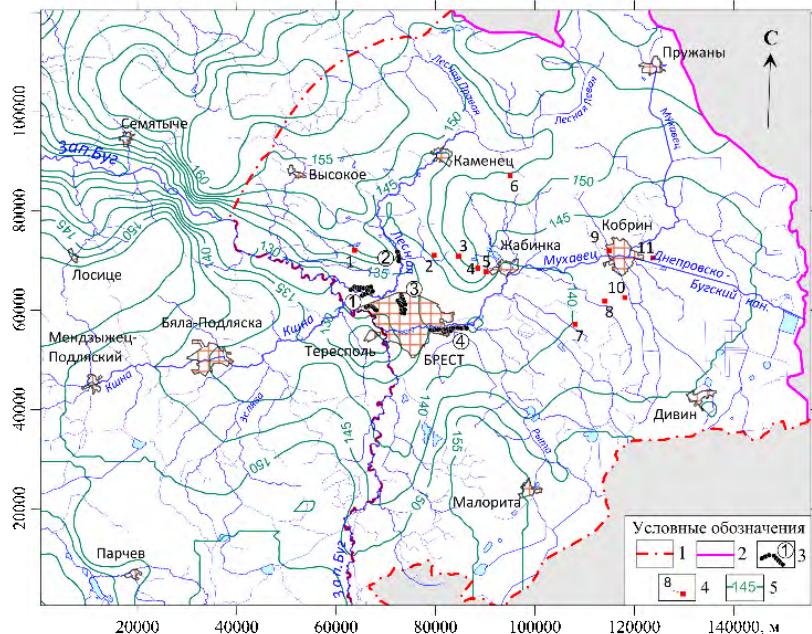


Рис. 6. Карта гидроизогипс водосборов рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающих территорий:
1–4 – те же, что и на рис. 5; 5 – гидроизогипсы

Fig. 6. The maps of the hydroisohypses of Kshna, Lesnaya, Muhavenets rivers water catchment areas and the territories nearby: 1–4 – see the symbols specification on fig. 5; 5 – hydroisohypses

Параметрами, которые количественно характеризуют степень гидравлической связи подземных и поверхностных вод через подрусловые отложения водотоков и водоемов, являются коэффициент фильтрации k_r и мощность m_r слабопроницаемых отложений в ложе водотока. При расчетах обычно используют коэффициент взаимосвязи $\chi_r = k_r / m_r$ и параметр $\Delta L = (Tm_r / k_r)^{1/2}$, характеризующий степень гидродинамического несовершенства водотока (где T – проводимость водоносного горизонта вблизи водотока). Следует отметить, что практически всегда χ_r или ΔL оценивается только для отдельных створов водотоков. Такие оценки носят локальный характер, поэтому характеризуют степень взаимосвязи поверхностных и ГВ лишь в тех расчетных блоках модели с рекой, по которым проводились режимные наблюдения или опытно-фильтрационные работы. Методическое обоснование возможности интерполяции полученных точечных результатов на всю гидрографическую сеть отсутствует.

На боковых границах грунтового и всех межпластовых ВК задано граничное условие 2-го рода с нулевым расходом ($Q = 0$). Физически это означает, что подземный и поверхностный водоразделы совпадают и водообмен с бассейнами соседних рек отсутствует. Внутренними границами являются реки Западный Буг, Кшна, Лесная, Мухавец, их притоки и мелиоративные каналы, а также эксплуатационные скважины водозаборов г. Бреста. Реки воспроизводятся как граничные условия 3-го рода. Водозaborные скважины заданы в виде граничного условия 2-го рода с постоянным дебитом ($Q = \text{const}$). За нижнюю (непроницаемую) границу модели «KLIM» принята подошва обводненных отложений осадочного чеха Подляско-Брестской впадины.

Территория моделируемых водосборов аппроксимирована квадратной сеткой с шагом 1000 м (156 блоков по оси X и 121 – по оси Y). Суммарная площадь водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец и сопредельных территорий, воспроизведенная на модели, равна 14 520 км² (всего 14 520 расчетных блоков (ячеек), из них 3864 – с поверхностными водоисточниками).

Калибрация численной геофильтрационной модели «KLIM». Калибрация выполнена по методике, апробированной и проверенной на примере модели «LiM» [4].

На 1-м этапе калибрации модели «KLIM» согласованы модельные и фактические (принятые в качестве исходных на модели) напоры ГВ. Величина коэффициента регуляризации (коэффициента перетока χ_{ϕ} фиктивного слабопроницаемого слоя на верхней гидродинамической границе модели «KLIM») при согласовании модельных и фактических напоров ГВ принята равной 0,001 1/сут. Для решения рассматриваемой задачи создана рабочая версия модели «KLIM» под именем «klim3wr».

Количественные значения элементов водного баланса всей исследуемой территории, полученные по результатам моделирования, в обобщенном виде представлены в табл. 2.

Таблица 2. Баланс грунтовых и поверхностных вод бассейнов рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающих территорий (после реализации на модели «klim3wr» речной сети в явном виде; $\chi_{\phi} = 0,001$ 1/сут)

Table 2. The balance of the underground and surface waters of Kshna, Lesnaya, Muhavets river basins and the territories nearby (after the realization on ‘klim3wr’ model of river network in obvious view; $\chi_{\phi} = 0.001$ 1/day)

Составляющая баланса	Единица измерения		
	м ³ /сут	мм/год	л/с·км ²
Результирующая величина инфильтрационного питания грунтовых вод	730 613	18,37	0,58
Питание грунтовых вод из блоков с реками	51 009	1,28	0,04
Результирующая величина разгрузки грунтовых вод в реки	336 002	8,45	0,27
Результирующая величина разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	445 619	11,20	0,36
Нисходящий переток грунтовых вод в соседний водоносный пласт	584 279	14,69	0,47

На 2-м этапе калибрации модели «KLIM» получена заданная (требуемая) величина подземного стока в реки. Основной результат этого этапа калибрации – оценка интенсивности инфильтрационного питания ГВ и общая структура баланса поверхностных, грунтовых и межпластовых вод на водосборах рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающей территории бассейна р. Западный Буг.

Результаты расчетов и моделирования по оценке структуры баланса грунтовых и поверхностных вод водосборов рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающих территорий после согласования исходной и модельной величины подземного стока в реки приведены в табл. 3.

Таблица 3. Общая структура баланса поверхностных, грунтовых и межпластовых вод водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец после согласования исходной и модельной величины подземного стока в реки (по результатам расчетов и моделирования)

Table 3. General balance structure of the surface, underground and interlayer waters of Kshna, Lesnaya and Muhoverts rivers water catchment areas after the adjustment of the initial and model admeasurement of underflow into the rivers (according to the results of accounting and modelling)

Составляющая баланса	Единица измерения		
	м ³ /сут	мм/год	л/с·км ²
Суммарная величина инфильтрационного питания грунтовых вод	405 6621	101,97	3,237
Суммарная величина питания грунтовых вод из блоков с реками	371	0,01	0,000
Суммарная величина разгрузки грунтовых вод в реки	1 718 317	43,19	1,371
Суммарная величина разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	2 338 675	109,22	1,866
Нисходящий переток грунтовых вод в палеоген-среднечетвертичный водоносный комплекс	568 299	14,29	0,454
Нисходящий переток межпластовых вод из палеоген-среднечетвертичного водоносного комплекса в оксфорд-сеноманский водоносный комплекс	150 258	3,78	0,120
Нисходящий переток межпластовых вод из оксфорд-сеноманского водоносного комплекса в верхнепротерозойский-нижнекембрийский водоносный комплекс	834	0,02	0,001

На более подробной характеристике естественных ресурсов ПВ водосборов Кшна, Лесная и Мухавец не станем останавливаться, так как ЧГФМ «KLIM» и ее калибрация создавались для решения других задач, а естественные ресурсы ПВ водосборов рек Лесная и Мухавец рассмотрены в работе [4].

Моделирование работы водозаборов г. Бреста на численной геофильтрационной модели «KLIM». Существующее водоснабжение г. Бреста, по данным государственного предприятия «НПЦ по геологии», базируется на эксплуатации ПВ объединенного оксфорд-нижнесеноманского терригенно-карбонатного комплекса четырьмя групповыми водозаборами – Граевский-1, Мухавецкий, Западный, Северный, а также ведомственными скважинами (рис. 7). Суммарный водоотбор по состоянию на 01.01.2015 равен 65600 м³/сут, из них – 27 300 м³/сут отбирается на водозаборе Мухавецкий, 16 500 м³/сут – на водозаборе Граевский-1, 14 300 м³/сут – на водозаборе Западный и 7500 м³/сут – на Северном водозаборе.



Рис. 7. Схема водозаборов г. Бреста (составлена М. П. Михадюк)

Fig. 7. The scheme of Brest city water catchment areas (compiled by M. P. Mihaduk)

Брестское месторождение пресных ПВ приурочено к бассейну р. Западный Буг и его притоков – рек Мухавец и Лесная. Действующие водозаборы расположены на территории города (Граевский-1), на его восточной (Мухавецкий) и западной (Западный) окраинах. Водозабор Северный удален на 6 км к северу от города.

Эксплуатационные запасы по водозаборам г. Бреста в объеме 86 000,0 м³/сут по категориям А + В впервые были утверждены протоколом ГКЗ СССР (Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых при Совете Министров СССР) от 30.08.1968 № 5472 по результатам поисково-разведочных гидро-геологических исследований, выполненных Белводгидротрестом в 1966–1968 гг.

К началу 1980-х годов суммарный водоотбор превысил количество утвержденных запасов и достиг 109 000,1 м³/сут, в связи с чем возникла острая необходимость в переоценке эксплуатационных запасов ПВ. Разведочные работы по переоценке запасов были выполнены Западной поисково-съемочной партией Белорусской геолого-поисковой экспедиции. Работы заключались в изучении режима ПВ на участках действующих водозаборов и проведении детальной разведки Северного участка.

Гидрогеологические исследования, проведенные для переоценки запасов, сопровождались большим объемом буровых, опытно-фильтрационных, геофизических, лабораторных и других видов работ. В процессе работ были детализированы геологическое строение и гидрогеологические условия участков местоположения водозаборов Западный и Северный; по данным режима эксплуатации и большого объема опытно-фильтрационных работ определены расчетные гидрогеологические параметры основного и перекрывающих водоносных горизонтов и комплексов и разделяющих их водоупоров; установлены условия формирования эксплуатационных запасов эксплуатируемого оксфордского-нижнесеноманского ВК. Было показано, что эксплуатация водозаборов г. Бреста проходит в стационарном режиме, а стабилизация режима обусловлена перетеканием воды из грунтового водоносного горизонта при постоянном напоре в нем.

На основе полученных данных была проведена переоценка эксплуатационных запасов ПВ существующих и перспективных водозаборов аналитическим методом для стационарной фильтрации и математическим моделированием в нестационарной постановке. Подсчет запасов методом математического моделирования был выполнен кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии Гомельского государственного университета (исполнители – А. Ф. Акулевич и В. Г. Жогло). Эксплуатационные запасы в количестве 221 300,0 м³/сут были утверждены протоколом ГКЗ СССР от 18.09.1987 № 10251.

Последний отчет по переоценке эксплуатационных запасов на водозаборах г. Бреста на перспективу 2042 г. составлен филиалом «Белорусская гидрогеологическая экспедиция» государственного предприятия «НПЦ по геологии» в 2015 г. Основой отчета явились данные режима эксплуатации водозаборов, материалы разведочных работ, сведения по химическому составу ПВ эксплуатируемого и питающих ВК (ответственный исполнитель – ведущий гидрогеолог М. П. Михадюк). На основе анализа и обобщения имеющихся данных по геологическому строению, гидрогеологическим и гидрохимическим условиям Брестского месторождения пресных ПВ на участках Граевский-1, Мухавецкий, Западный и Северный установлено, что оксфордский-нижнесеноманский ВК, используемый в качестве эксплуатационного для водоснабжения г. Бреста, имеет повсеместное распространение как на участках водозаборов, так и в зоне их влияния, обладает относительно выдержаными и спокойными условиями залегания, выдержанной мощностью и однородными фильтрационными свойствами. Геологическое строение и гидрогеологические условия перекрывающих и подстилающих отложений в целом для всего района и каждого из участков водозабора в частности характеризуются полной аналогией. Мергельно-меловая толща среднего сеномана-кампана, являющаяся относительным водоупором, отделяющим эксплуатируемый комплекс от широко распространенного комплекса палеоген-неоген-четвертичных отложений, характеризуется повсеместным распространением и фильтрационной однородностью.

Фильтрационные характеристики эксплуатируемого ВК и перекрывающих горизонтов и комплексов (проводимость, параметр перетекания) с высокой степенью надежности определены как по результатам опытно-фильтрационных исследований, проведенных на водозаборах во время поисково-разведочных гидрогеологических работ, так и по режиму эксплуатации водозаборов.

Основным источником формирования эксплуатационных запасов ПВ оксфордского-нижнесеноманского ВК являются привлекаемые естественные ресурсы, формируемые за счет перетекания воды из грунтового водоносного горизонта и рек. Качество ПВ эксплуатируемого и перекрывающих водоносных горизонтов и комплексов, как в естественных условиях, так и за прошедший период эксплуатации, соответствует действующим нормам для вод хозяйственно-питьевого водоснабжения. Подсчет запасов выполнен аналитическим способом по схеме перетекания с постоянным напором в питающих горизонтах для условий неограниченного в плане пласта.

На утверждение республиканской комиссии по запасам полезных ископаемых Республики Беларусь представлены эксплуатационные запасы ПВ по категориям А + В + С оксфордского-нижнесеноманского ВК в количестве 221 700,0 м³/сут. Их распределение по участкам водозаборов и категориям приведено в табл. 4.

Таблица 4. Распределение эксплуатационных запасов Брестского месторождения подземных вод по участкам водозаборов и категориям

Table 4. The distribution of the exploitative stocks of Brest underground waters deposit according to water intakes and categories

Водозабор	Количество скважин			Расчетная нагрузка	Эксплуатационные запасы, тыс. м ³ /сут			
	всего	пробуренных	проектных		A	B	C	A + B + C
Граевский-1	18	18	–	2000	16,0	20,0	–	36,0
Мухавецкий	46	30	16	1900	29,7	57,7	–	87,4
Западный	23	23	–	1900	12,4	31,3	–	43,7
Северный	26	5	21	2100	7,7	23,1	23,8	54,6
<i>Всего</i>	<i>113</i>	<i>76</i>	<i>37</i>	–	<i>65,8</i>	<i>132,1</i>	<i>23,8</i>	<i>221,7</i>

Общая сумма утверждаемых эксплуатационных запасов ПВ, равная 221700,0 м³/сут, использована нами для оценки влияния водозаборов Граевский-1, Мухавецкий, Западный и Северный на качественное состояние ПВ. Решение геофильтрационной задачи выполнено в стационарной постановке на модели «KLIM».

По результатам расчетов построена цифровая карта понижения напоров ПВ эксплуатируемого оксфорд-сеноманского ВК, представленная на рис. 8, из которого видно, что вокруг водозаборов сформировалась обширная воронка депрессии и влияние водозаборов распространяется на территорию Польши.

Структура баланса поверхностных, грунтовых и межпластовых вод на территории водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец при проектной производительности водозаборов г. Бреста приведена в табл. 5.

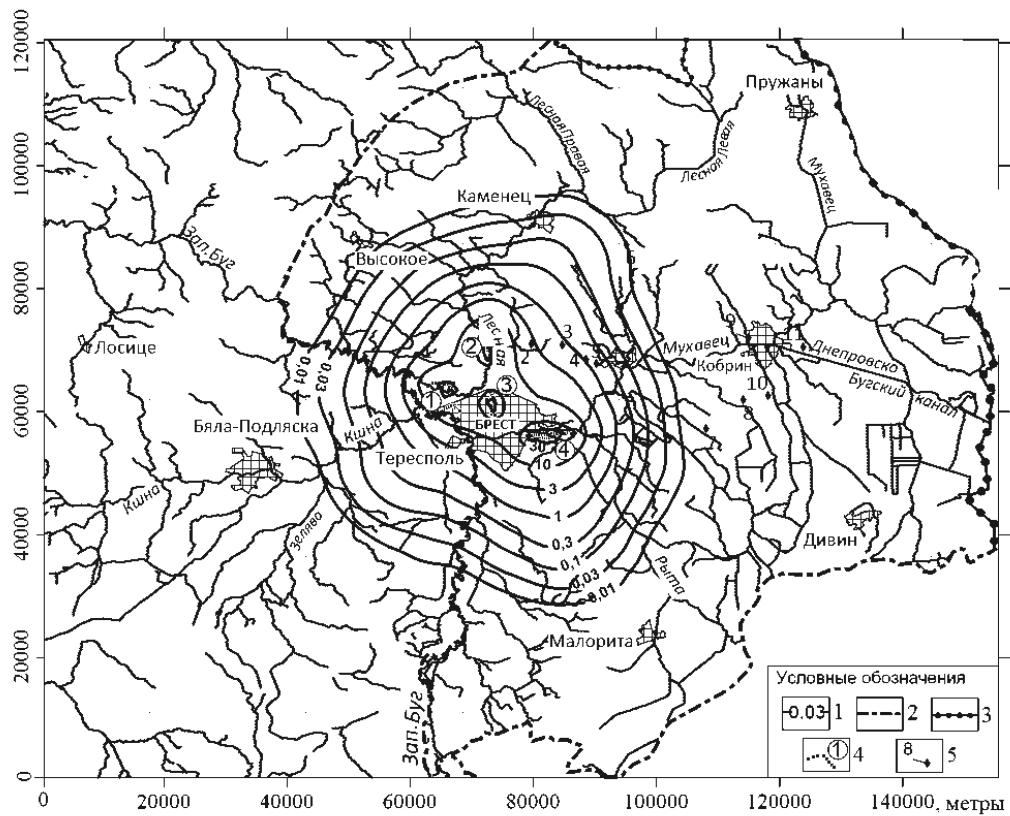


Рис. 8. Цифровая карта понижения напоров подземных вод оксфорд-сеноманского водоносного комплекса на территории водосборов рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающих территорий при проектной величине водоотбора: 1 – изолинии понижения напоров подземных вод; 2 – государственная граница Республики Беларусь; 3 – граница водосборов рек Мухавец и Лесная; 4 – водозаборы г. Бреста; 5 – объекты локального мониторинга

Fig. 8. A numeric map of the decrease in the underground waters inrush of Oxfordian-Cenomanian aquifer water complex on the territory of the Kshna, the Lesnaya, the Muhavets rivers and the territories nearby during the project quantity of water catchment areas: 1 – the isolines of the decrease in underground waters inrush; 2 – the country border of the Republic of Belarus; 3 – the borders of Muhavets and Lesnaya rivers water catchment areas; 4 – Brest city water intakes; 5 – local monitoring objects

Таблица 5. Структура баланса грунтовых и межпластовых вод на территории водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец при проектной производительности водозаборов г. Бреста на перспективу 2042 г., м³/сут

Table 5. The balance structure of underground and interlayer waters on the territory of Kshna, Lesnaya, Muovets rivers water catchment areas during the project capacity of Brest city water intakes for the prospects of 2042, m³/day

Водоносный комплекс	Направление процесса	Водозаборы ($Q = \text{const}$)	Расход подземных вод через		Дисбаланс притока и оттока
			подошву ВК	кровлю ВК	
Грунтовый водоносный комплекс (верхний)	Приток	0,0	+527 209	+4 678 428	+4,0
	Отток	0,0	-748 905	-4 678 424	
Палеоген-среднечетвертичный водоносный комплекс (средний)	Приток	0	+132 841	+748 905	-4,0
	Отток	0,0	-354 541	-527 209	
Оксфорд-сеноманский водоносный комплекс (нижний)	Приток	0	+1571	+354 541	+0,0
	Отток	-221 700,0	-1571	-132 841	
Верхний протерозой – нижний кембрий (33В)	Приток	0,0	0,0	+1571	+0,0
	Отток	0,0	0,0	-1571	

В условиях ненарушенного режима фильтрации ПВ в балансово-замкнутом гидрогеологическом объекте структура водообмена между водоносными горизонтами (комплексами, пластами) через слабо-проницаемые слои является весьма простой: нисходящие перетоки воды на водоразделах, включая другие возвышенные элементы рельефа, и восходящие перетоки в долинах рек и на других землях с пониженными отметками рельефа. При решении задачи в стационарной постановке суммарные величины перетоков равны по модулю, но отличаются по знаку. Некоторые балансовые расхождения могут быть вызваны вычислительными ошибками и возможностями алгоритмов, лежащих в основе компьютерных вычислительных программ.

В процессе работы водозаборов структура пространственного потока усложняется, а направления движения ПВ вод изменяются в соответствии конфигурацией речной сети и местоположением водозаборов. Наиболее интересны оценки по инфильтрационному водообмену, происходящему между поверхностью земли и депрессионной поверхностью ГВ, т. е. верхней гидродинамической границей моделируемой области (табл. 6).

Таблица 6. Структура баланса грунтовых и поверхностных вод на территории водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец при проектной производительности водозаборов г. Бреста на перспективу 2042 г., м³/сут

Table 6. The balance structure of underground and surface waters on the territory of Kshna, Lesnaya, Muhevets rivers water catchment areas during the project capacity of Brest city water intakes for the prospects of 2042, m³/day

Составляющая баланса	Единица измерения		
	м ³ /сут	мм/год	л/с·км ²
Суммарная величина инфильтрационного питания грунтовых вод	4 056 621	101,97	3,237
Суммарная величина питания грунтовых вод из блоков с реками	36 927	0,93	0,029
Сокращение величины разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	57 671	1,45	0,046
Суммарная величина разгрузки грунтовых вод в реки	1 655 865	41,62	1,321
Суммарная величина разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	2 273 654	57,15	1,814
Нисходящий переток грунтовых вод в палеоген-среднечетвертичный водоносный комплекс	748 905	18,83	0,598
Восходящий переток межпластовых вод из палеоген-среднечетвертичного водоносного комплекса в грунтовый водоносный комплекс	527 209	13,25	0,421

Непосредственно на участках водозаборов эксплуатационные запасы межпластового оксфорд-сеноманского ВК формируются за счет перетоков воды через подошву вышележащего палеоген-среднечетвертичного ВК (+354 541 м³/сут – приток в пласт; –132 841 м³/сут – отток из пласта). Разница между притоком и оттоком представляет собой суммарный дебит водозаборов (–221 700 м³/сут – отток воды в скважины). Отмечается некоторая активизация потока ПВ в верхнепротерозойском-нижнекембрийском ВК зоны замедленного водообмена. Интенсивность водообмена с оксфорд-сеноманским ВК увеличилась с 834 до 1571 м³/сут. Однако верхнепротерозойский-нижнекембрийский ВК не участвует в формировании эксплуатационных запасов ПВ оксфорд-сеноманского ВК: приток воды снизу на участках размещения водозаборов (+1571 м³/сут) компенсируется оттоком вниз такого же количества воды (–1571 м³/сут) на периферии воронки депрессии.

По данным о структуре баланса грунтовых и поверхностных вод на территории водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец в естественных условиях (см. табл. 3) и при проектной производительности водозаборов г. Бреста (см. табл. 6) нами определены количественные показатели источников формирования эксплуатационных запасов ПВ Брестского месторождения (табл. 7).

Обычно на начальной стадии работы водозаборов важную роль играют упругие запасы ПВ в пределах формируемой воронки депрессии. В табл. 7 этот источник эксплуатационных запасов отсутствует, так как нами рассматривается стационарный процесс фильтрации, при котором изменения напоров ПВ во времени отсутствуют, соответственно, упругие запасы ПВ себя не проявляют.

Таблица 7. Источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод оксфорд-сеноманского водоносного комплекса при проектной производительности водозаборов г. Бреста, м³/сут**Table 7. The sources of the formation of the exploitative stocks of the underground waters of Oxfordian-Cenomanian aquifer water complex during Brest city water intakes project capacity, m³/day**

Источник эксплуатационных запасов подземных вод	Единица измерения		
	м ³ /сут	мм/год	л/с·км ²
Перехват речного стока (привлекаемые ресурсы из рек)	36556	0,92	0,029
Сокращение разгрузки грунтовых вод в реки	62452	1,57	0,050
Прекращение разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	57671	1,45	0,046
Сокращение разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	65021	1,63	0,052

Результаты решения геомиграционной задачи. Долгосрочный прогноз изменения качества подземных вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец. Технология моделирования. Модельные величины напоров межпластовых и ГВ, вычисленные при проектной производительности водозаборов г. Бреста, приняты в качестве исходных на боковых границах всех водоносных горизонтов геофильтрационной модели «ML-Mf». Заданы также все водозаборные скважины, попавшие на территорию, воспроизведенную на этой модели. Сюда вошли все эксплуатационные скважины водозаборов Западный, Северный и Граевский-1. На верхней границе модели «ML-Mf» воспроизведены реки, инфильтрационное питание и эвапотранспирационная разгрузка ГВ. При заданных таким образом граничных условиях решена геофильтрационная задача в стационарной постановке. Полученное поле скоростей ПВ принято за основу при решении геомиграционной задачи на модели «ML-Mm». По результатам моделирования определены расчетные значения концентрации мигранта во всех ВК на заданные моменты времени. В обобщенном виде результаты приведены в табл. 8.

Таблица 8. Обобщенные прогнозные данные по изменению качества подземных вод в зоне влияния источников загрязнения при проектной производительности водозаборов г. Бреста (модель «ML-Mm»)**Table 8. Generalized forecast data on the underground waters quality change in the zone of pollution sources influence during Brest city water intakes project capacity ('ML-Mm' model)**

Прогнозный период, лет	Водоносный комплекс	Количество расчетных блоков модели с C > 5,0 %	Площадь загрязнения с C > 5,0 %, км ²	Концентрация мигранта C, %	
				средняя	максимальная
0–5	Грунтовый	71	7,88	23,96	59,06
	Палеоген-среднечетвертичный	21	2,33	7,24	14,35
	Оксфорд-сеноманский	–	–	–	–
0–10	Грунтовый	114	12,65	27,02	78,82
	Палеоген-среднечетвертичный	44	4,88	14,04	36,30
	Оксфорд-сеноманский	–	–	–	–
0–25	Грунтовый	208	23,09	27,25	96,84
	Палеоген-среднечетвертичный	109	12,10	20,29	70,42
	Оксфорд-сеноманский	4	0,44	5,48	5,83
0–50	Грунтовый	341	37,85	26,13	99,92
	Палеоген-среднечетвертичный	231	25,64	21,74	96,01
	Оксфорд-сеноманский	66	7,33	7,31	16,43
0–100	Грунтовый	464	51,50	24,46	100,00
	Палеоген-среднечетвертичный	393	43,62	22,79	99,91
	Оксфорд-сеноманский	186	20,65	10,06	32,51

Сравнение данных, приведенных в табл. 1 и табл. 8, показывает, что водозаборы г. Бреста не оказали значимого влияния на масштабы загрязнения ПВ грунтового и палеоген-среднечетвертичного ВК. Основные изменения связаны с оксфорд-сеноманским ВК. Отбор ПВ из этого продуктивного комплекса в объеме 221,7 тыс. м³/сут увеличивает напорные градиенты потока и, соответственно, скорости движения ПВ.

Более наглядно описываемый процесс отражает рис. 9, на котором показаны ареалы загрязнения ПВ оксфорд-сеноманского ВК при функционировании источников загрязнения в течение 50 и 100 лет.

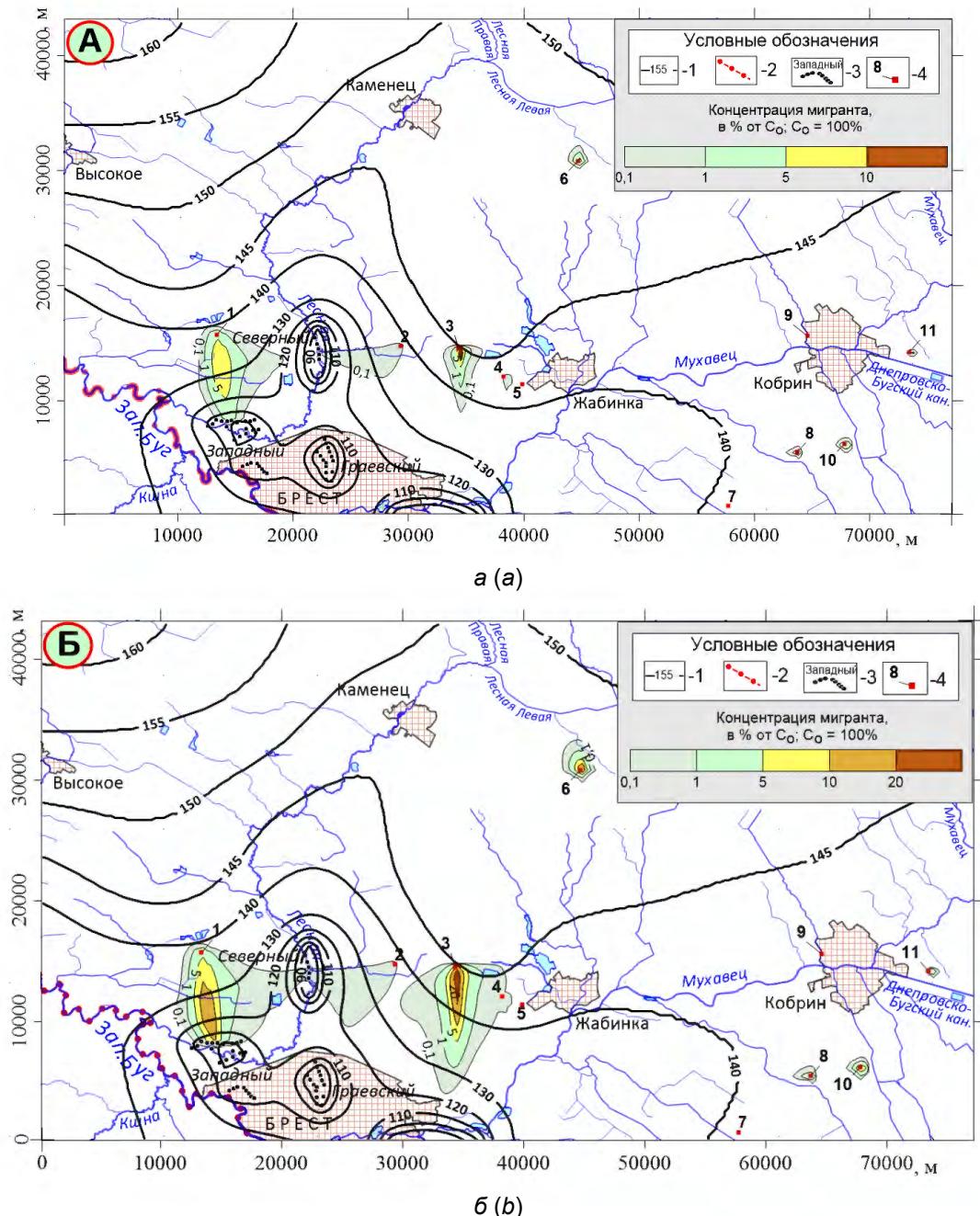


Рис. 9. Прогнозные карты загрязнения подземных вод оксфорд-сеноманского водоносного комплекса на объектах локального мониторинга в бассейнах рек Лесная и Мухавец при работе водозаборов г. Бреста с дебитом 221,7 тыс. м³/сут на периоды 0–50 (а) и 0–100 (б) лет

Fig. 9. The forecast maps of the underground waters of Oxfordian-Cenomanian aquifer water complex pollution on the local monitoring objects in Lesnaya and Muhevets river basins during Brest city water intakes operation with the flow rate of 221.7 thous. m³/day for the periods of 0–50 (a) and 0–100 (b) years

Судя по рис. 9, загрязняющие вещества уже достигли водозабора Западный. И если допустить, что свиноводческий комплекс «Западный» (см. рис. 9, источник загрязнения № 1), построен в 1970 г., то отходы его производства уже в наши дни могут быть обнаружены в ПВ, отбираемых из оксфорд-сеноманского ВК на водозаборе Западный. Обнадеживает лишь тот факт, что в настоящее время суммарный дебит водозаборов г. Бреста равен не 221,7 тыс. м³/сут, а лишь 65,5 тыс. м³/сут воды.

Выводы.

1. Создана численная модель фильтрации и миграции ПВ в зоне влияния водозаборов г. Бреста. Выполнен прогноз изменения качественного состояния ПВ в междуречье Лесная и Мухавец на длительную перспективу (до 100 лет) в естественных условиях и при работе водозаборов г. Бреста. По результатам моделирования составлены прогнозные карты загрязнения ПВ грунтового, палеоген-среднечетвертичного и оксфорд-сеноманского ВК на 5, 10, 25, 50 и 100 лет при фильтрации ПВ в естественных условиях и при работе водозаборов г. Бреста.

2. Установлено, что в естественных условиях миграция загрязнений во времени идет крайне медленно. В течение прогнозного периода (100 лет) загрязнению подвергаются грунтовый, палеоген-среднечетвертичный и оксфорд-сеноманский ВК. Негативному воздействию не подвергается верхнепротерозойский нижнекембрийский ВК, входящий в зону замедленного водообмена. Расчетная концентрация мигранта в этом комплексе через 100 лет не превышает 0,003 % от его концентрации в источниках загрязнения.

3. Водозаборы г. Бреста не оказали значимого влияния на масштабы загрязнения ПВ грунтового и палеоген-среднечетвертичного ВК. Основные изменения связаны с эксплуатируемым оксфорд-сеноманским ВК. Отбор ПВ из этого комплекса в объеме 221,7 тыс. м³/сут увеличивает напорные градиенты потока и, соответственно, скорости движения ПВ. В течение 50 лет фронт загрязнения от свиноводческого комплекса «Западный» подтягивается до линии водозабора «Западный», эксплуатационные скважины которого оборудованы на оксфорд-сеноманский ВК.

4. Для повышения надежности прогнозных оценок изменения качества ПВ необходим учет всех природных и техногенных факторов, оказывающих значимое влияние на условия миграции водорастворимых загрязняющих веществ в водонасыщенных горных породах.

5. Приведенные в статье результаты исследований могут рассматриваться как основа для обоснования решений по управлению качественным и количественным состоянием ПВ на территории водосборов рек Лесная и Мухавец.

Список использованных источников

1. Решение задач охраны подземных вод на численных моделях / Г. Н. Гензель, Н. Ф. Караваевцев, П. К. Коносавский [и др.] ; под ред. В. А. Мироненко. – М. : Недра, 1992. – 240 с.
2. Ломакин, Е. А. Численное моделирование геофильтрации / Е. А. Ломакин, В. А. Мироненко, В. М. Шестаков. – М. : Недра, 1988. – 228 с.
3. Мироненко, В. А. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах / В. А. Мироненко, Е. В. Мольский, В. Г. Румынин. – Л. : Недра, 1988. – 279 с.
4. Жогло, В. Г. Особенности формирования естественных ресурсов подземных вод Брестского гидрогеологического бассейна / В. Г. Жогло // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 94–122.
5. Шестаков, В. М. Гидрогеодинамика / В. М. Шестаков. – М. : КДУ, 2009. – 334 с.
6. Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ : учеб. пособие / под ред. Р. С. Штенгелова. – М. : Изд-во МГУ, 1994. – 335 с.
7. Гидрогеологическое прогнозирование : пер. с англ. / под ред. М. Г. Андерсона и Т. П. Берта. – М. : Мир, 1988. – 736 с.
8. Галкин, А. Н. Диффузионно-осмотические свойства глинистых грунтов Гомельского промышленного района : автореф. дис. ... канд. геол-минер. наук : 04.00.07 / Галкин Александр Николаевич ; МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 1999. – 22 с.
9. Дривер, Дж. Геохимия природных вод / Дж. Дривер ; пер. с англ. Л. Н. Барабанова, Г. А. Соломина ; под ред. С. И. Смирнова. – М. : Мир, 1985. – 440 с.
10. Жогло, В. Г. Мониторинг подземных вод на водозаборах и экологически опасных объектах юго-востока Беларуси / В. Г. Жогло, А. Н. Галкин. – Витебск : ВГУ им. П. М. Машерова, 2008. – 161 с.
11. Жогло, В. Г. Система численных геофильтрационных моделей верхнего этажа гидролитосферы юго-востока Республики Беларусь / В. Г. Жогло ; НАН Беларусь, Ин-т геол. наук. – Минск, 2001. – 176 с.
12. Шестаков, В. М. Геогидрология – научное направление и образовательная дисциплина / В. М. Шестаков // Вестник Московского университета. Серия 4, Геология. – 1999. – № 4. – С. 75–80.

References

1. Genzel' G. N., Karachevtsev N. F., Konosavskiy P. K., Kravchuk S. V., Mironenko V. A., Romanin V. G. *Reshenie zadach ohrany podzemnykh vod na chislennykh modelyakh* [Solving problems of groundwater protection on numerical models]. Ed. V. A. Mironenko. Moscow, Nedra Publ., 1992, 240 p. (in Russian)
2. Lomakin E. A., Mironenko V. A., Shestakov V. M. *Chislennoe modelirovanie geofil'tratsii* [Numerical modeling of geo-filtration]. Moscow, Nedra Publ., 1988, 228 p. (in Russian)
3. Mironenko V. A., Mol'skiy E. V., Rumynin V. G. *Izuchenie zagryazneniya podzemnykh vod v gornodobyvayushchikh rayonakh* [Study of groundwater pollution in mining areas]. Leningrad, Nedra Publ., 1988, 279 p. (in Russian)
4. Zhoglo V. G. *Osobennosti formirovaniya estestvennykh resursov podzemnykh vod Brestskogo gidrogeologicheskogo basseyna* [Peculiarities of formation of natural groundwater resources of Brest hydrogeological basin]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 94–122. (in Russian)
5. Shestakov V. M. *Gidrogeodinamika* [Hydro-geodynamics]. Moscow, 2009, 334 p. (in Russian)
6. *Gidrogeodinamicheskie raschety na EVM* [Hydrogeodynamic calculations on the computer]. Ed. R. S. Shtengelova. Moscow, 1994, 335 p. (in Russian)
7. *Gidrogeologicheskoe prognozirovaniye* [Hydrogeologic forecasting]. Ed. M. G. Andersona and T. P. Berta. Moscow, Mir Publ., 1988, 736 p. (in Russian)
8. Galkin A. N. *Diffuzionno-osmoticheskie svoystva glinistykh gruntov Gomel'skogo promyshlennogo rayona. Avtoreferat dissertatsii kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk* [Diffusion-osmotic properties of clayey soils of Gomel industrial area. Abs. PhD geol.-mineral. sci.]. Moscow, 1999, 22 p. (in Russian)
9. Driver Dz. *Geokhimiya prirodnnykh vod* [Geochemistry of natural waters]. Moscow, Mir Publ., 1985, 440 p. (in Russian)
10. Zhoglo V. G., Galkin A. N. *Monitoring podzemnykh vod na vodozaborakh i ekologicheski opasnykh ob'ektakh yugo-vostoka Belarusi* [Groundwater monitoring at water intakes and ecologically dangerous objects in the south-east of Belarus]. Vitebsk, 2008, 161 p. (in Russian)
11. Zhoglo V. G. *Sistema chislennykh geofil'tratsionnykh modeley verkhnego etazha gidrolitosfery yugo-vostoka Respubliki Belarus'* [System of numerical geofiltration models of the upper floor of the hydrolithosphere of the south-east of the Republic of Belarus]. Minsk, 2001, 176 p. (in Russian)
12. Shestakov V. M. *Geohydrologiya – nauchnoe napravlenie i obrazovatel'naya distsiplina* [Geohydrology – scientific direction and educational discipline]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya = Bulletin of Moscow University. Series 4. Geology*, 1999, no. 4, pp. 75–80. (in Russian)

Информация об авторе

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

Information about the author

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