УДК 556; 628 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-16-30*

Оригинальная статья/Original paper

Проведение прогнозного моделирования поступления загрязненных грунтовых вод в реку Вятку в рамках трехмерного подхода

Т. П. Любимова, Я. Н. Паршакова

lyubimovat@mail.ru

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Одной из ключевых и методологически сложных задач в экологической гидрогеологии является проблема диффузного загрязнения водоемов. Его источником служат загрязняющие вещества, аккумулированные в геологической среде за долгий период и постепенно выносимые в водные объекты. Особую актуальность этот процесс приобретает в зонах влияния крупных промышленных комплексов, где он имеет характерные черты. К ним относятся высокая интенсивность миграционных потоков, а также специфика генезиса: зачастую загрязнение обусловлено не текущими производственными выбросами, а воздействием «отложенного» или «исторического» экологического ущерба – выносом накопленных в прошлом загрязнений. Именно такая картина наблюдается в бассейне р. Вятки и системе ее пойменных озер, испытывающих значительную нагрузку со стороны Кирово-Чепецкого промышленного узла. **Методы.** Для математического описания миграции загрязняющих веществ в подземных водах использована модель пористой среды, уравнения которой включают в себя член диффузии импульса. Численное решение задачи о транспорте примесей в геологическом массиве основывалось на представлении о ламинарном режиме фильтрации, что справедливо для низких значений числа Рейнольдса. Рассмотрение велось в нестационарной постановке в условиях постоянства температуры. Вычислительная сетка строилась с адаптацией – увеличением плотности узлов в области нижнего водоносного горизонта. **Результаты.** Методом численного моделирования исследован процесс формирования диффузного загрязнения р. Вятки в результате сброса вод из пойменных водоемов (карьеров и озер) в зоне влияния Кирово-Чепецкого промышленного узла. На примере вертикального разреза озера Бобровое 1 определены объемы и скорость поступления соединений азота в речную систему. Полученные данные послужили основой для проектирования природоохранных мер, призванных минимизировать диффузный сток и гарантировать соответствие установленным нормативам качества воды на ключевом питьевом водозаборе г. Кирова.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диффузные источники, отложенное загрязнение, пойма реки Вятки, водозабор, город Киров, численное моделирование

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания, регистрационный номер 121031700169-1.

Для цитирования: Любимова Т. П., Паршакова Я. Н. Проведение прогнозного моделирования поступления загрязненных грунтовых вод в реку Вятку в рамках трехмерного подхода // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 16–30. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-16-30; EDN: VIBIYN

© Любимова Т. П., Паршакова Я. Н., 2026

Conducting predictive modeling of contaminated groundwater inflow into the Vyatka River using a three-dimensional approach

Tatiana P. Lyubimova ✉, **Yanina N. Parshakova**

✉ lyubimovat@mail.ru

Institute of Continuum Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

ABSTRACT

Relevance. One of the key and methodologically challenging problems in environmental hydrogeology is the problem of diffuse pollution of water bodies. Its source is pollutants accumulated in the geological environment over a long period and gradually released into water bodies. This process is particularly relevant in areas affected by large industrial complexes, where it exhibits specific characteristics. These include the high intensity of migration flows, as well as the specific nature of its genesis: pollution is often caused not by current industrial emissions, but by the impact of "deferred" or "historical" environmental damage—the removal of pollutants accumulated in the past. This is precisely the situation observed in the Vyatka River basin and its floodplain lake system, which are significantly impacted by the Kirovo-Chepetsk industrial hub. **Methods.** To mathematically describe the migration of pollutants in groundwater, a porous medium model was used, the equations of which include a momentum diffusion term. The numerical solution to the problem of impurity transport in a geological massif was based on the concept of laminar filtration, which is valid for low Reynolds numbers. The analysis was conducted in a non-stationary setting under constant temperature conditions. The computational grid was constructed with adaptation—increasing the node density in the region of the lower aquifer. The width of the contaminated lake, which serves as the source, was taken into account by averaging the parameters. **Results.** Numerical modeling was used to study the formation of diffuse pollution of the Vyatka River as a result of water discharges from floodplain reservoirs (quarries and lakes) in the zone of influence of the Kirovo-Chepetsk industrial hub. Using a vertical section of Lake Bobrovoe 1 as an example, the volumes and rate of nitrogen compound influx into the river system were determined. The obtained data served as the basis for designing environmental measures aimed at minimizing diffuse runoff and ensuring that water quality at the key drinking water intake in the city of Kirov meets established standards.

KEYWORDS: diffuse sources, delayed pollution, Vyatka River floodplain, water intake, the city of Kirov, numerical modeling

Financing: This study was conducted within the framework of a state assignment, registration number 121031700169-1.

For citation: Lyubimova T. P., Parshakova Y. N. Conducting predictive modeling of contaminated groundwater inflow into the Vyatka River using a three-dimensional approach. Water Sector of Russia: Problems, Technologies. Management. 2026. No. 1. P. 16–30. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-16-30; EDN: VIBIYN

ВВЕДЕНИЕ

Формирование рассеянного (диффузного) загрязнения водных систем представляет собой результат взаимодействия различных природных механизмов – гидрологических и геохимических – и в значительной степени связано с миграцией загрязняющих веществ из исторически накопленных, а не

современных производственных отходов [1, 2]. Ярким примером служит промышленный узел г. Кирово-Чепецка (Кирово-Чепецкий химический комбинат), расположенный в пойменной зоне р. Вятки. За длительный период работы предприятия здесь был создан комплекс крупных объектов для хранения и нейтрализации отходов. Ключевыми из них являются: специализированный полигон для отходов III–IV классов опасности, трехсекционный накопитель шламов, хранилище меловых хвостов, а также полигон для глубинной изоляции промышленных стоков путем их закачки в подземные горизонты [3]. До 1987 г. сброс промышленных вод осуществлялся непосредственно в поверхностные водоемы. С 1987 г. и по настоящее время применяется технология глубинного захоронения: сточные воды закачиваются в изолированный пласт-коллектор, залегающий на глубине 1,1–1,3 км (интервал 1125–1287 м).

В системе водоснабжения г. Кирова, находящегося в зоне воздействия Кирово-Чепецкого промышленного узла, центральное место занимает Корчемкинский водозабор на р. Вятке. Качество водных ресурсов в районе расположения водозаборных оголовков характеризуется выраженной сезонной динамикой концентраций аммиака, выступающего в роли приоритетного (лимитирующего) загрязнителя. В период межени уровни аммиака стабильно не превышают установленный норматив ПДК в 2 мг/л. Однако в весеннее половодье фиксируется значительный рост концентраций данного соединения, величина которых может достигать 2–4 ПДК. Существенный вклад в формирование загрязненного стока вносят объекты захоронения промышленных отходов, такие как шлакоотвалы и хвостохранилища. Согласно исследованиям [4–6], эти объекты сохраняют потенциал негативного воздействия на экосистемы даже в условиях существенного сокращения производственной активности.

Гидрогеологические условия территории, определяющие закономерности миграции загрязняющих веществ, детально проанализированы в работе [6]. Ключевым фактором, осложняющим процессы фильтрации и массопереноса, является литологическая неоднородность геологического разреза, представленного чередованием проницаемых песчаных и слабопроницаемых суглинистых и глинистых отложений.

Прогресс в понимании механизмов рассеянного загрязнения окружающей среды стал возможен благодаря интеграции методов полевого мониторинга и вычислительного эксперимента. Геохимические исследования [7–9] выявили преобладание в почвах и донных отложениях слабосвязанных (подвижных) форм тяжелых металлов. Эта особенность способствует высокой миграционной активности загрязняющих веществ и их вовлечению в процессы переноса в окружающей среде. В работах [10, 11] продемонстрировано, что важным механизмом распространения загрязнений в подземных и поверхностных водах данного региона является их транспорт в составе коллоидных фракций.

Для выявления источников загрязняющих компонентов, таких как сульфат-ионы, успешно применяются методы изотопного анализа [12, 13]. Анализ экспериментальных данных и построение прогнозных сценариев осуществляются на основе методов математического моделирования. Исходной информацией для таких вычислительных моделей служат данные натурных измерений, среди которых ключевыми являются гидравлические параметры пород (коэффициент фильтрации, пористость). Эти параметры определяются в полевых условиях и в рамках лабораторного анализа отобранных образцов кернов.

Актуальной научно-прикладной задачей является разработка аналитических и численных моделей для промышленных комплексов, расположенных в районах крупных водных объектов [14, 15]. Особое внимание в таких исследованиях уделяется механизмам фильтрационного транспорта жидких фаз из накопителей в грунты и водоносные горизонты [16, 17], а также организации мониторинга состояния гидросферы в зонах влияния промышленных объектов [18–21]. Данные мониторинга свидетельствуют о присутствии повышенных концентраций растворимых компонентов отходов в прилегающих водных средах. Потенциальные повреждения изолирующих барьеров накопителей обусловливают необходимость создания адекватных моделей инфильтрационного загрязнения, способных прогнозировать его динамику и масштабы.

В рамках данной работы рассмотрено поступление диффузного загрязнения в геологической среде в районе объектов Кирово-Чепецкого химического комбината (КЧХК). На основе результатов численного моделирования построена разведочная геомиграционная модель с прогнозной оценкой пространственного и временного распространения аммоний-иона в грунтовых водах (Кировская область). Требуемые входные параметры и условия для проведения численного эксперимента определены исходя из данных натурных измерений.

В формировании гидрохимического режима водных объектов и прилегающих к ним территорий существенную роль играют плотностные стратификационные эффекты, обусловливаемые неоднородностью распределения полей минерализации. При концентрации тяжелого элемента более чем 1 промилле они оказывают большое влияние на характер потока. Такие эффекты не могут быть описаны с помощью гидродинамических моделей в рамках уравнений мелкой воды, для их корректного описания необходимо использование гидродинамических моделей в полной трехмерной негидростатической постановке.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Для анализа миграции загрязняющих веществ в подземных горизонтах используется математическая модель, рассматривающая грунт как сплошную пористую среду. Учитывая доминирование вязкостных сил, течение жидкости описывается в приближении малых чисел Рейнольдса, что позволяет применять линеаризованные уравнения движения с учетом диффузионного перено-

са импульса. Данный подход составляет основу для последующего численного решения задач о конвективно-диффузионном переносе примесей в насыщенных грунтовых пластах:

$$\mathrm{Re} = \mathrm{v}_a h / \nu < 2000, \quad (1)$$

где v_a – средняя скорость потока;

h – характерный размер исследуемой области;

ν – кинематическая вязкость жидкости.

В настоящем исследовании $\mathrm{v}_a = 10^{-7}$ м/с, $h = 2000$ м, $\nu = 1e-06$ м^2/с, при таких параметрах $\mathrm{Re} = 200$. Поэтому моделирование проводилось в рамках ламинарной модели.

Моделирование выполнено с использованием нестационарной изотермической постановки задачи. Для повышения точности расчетов в области, прилегающей к нижнему водоносному горизонту, была построена адаптивная пространственная расчетная сетка с повышенной плотностью узлов. Математическая модель включает систему уравнений движения, которая в тензорной форме записи имеет вид:

$$\frac{\partial(m\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \mathrm{v}_i) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{m}\rho \mathrm{v}_i\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{1}{m^2}\rho \mathrm{v}_i \mathrm{v}_j\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\mu}{m}\left(\frac{\partial \mathrm{v}_i}{\partial x_j}\right)\right] - \frac{\mu}{K}\mathrm{v}_i + \rho g_i, \quad (3)$$

где m, K – пористость и проницаемость пористой среды соответственно;

ρ – плотность жидкости;

v_i – компоненты вектора скорости (i = 1, 2, 3);

μ – кинематическая вязкость жидкости. Плотность считалась зависящей от минерализации воды по линейному закону $\rho = \rho_0 + 0{,}702s$ кг/м^3, где $\rho_0 = 1000{,}196$ кг/м^3 – плотность чистой воды и s – измеренная в промилле массовая концентрация растворенных в воде солей.

Уравнение переноса примеси имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\rho c) + \nabla \cdot (\rho \vec{\mathrm{v}} c) = -\nabla \cdot \vec{J}. \quad (4)$$

Здесь $\vec{J}$ – диффузионный поток примеси, определяемый выражением:

$$\vec{J} = -\rho D_m \nabla c, \quad (5)$$

где D_m – заданный коэффициент молекулярной диффузии.

На твердых границах расчетной области задаются условия прилипания и отсутствия потока вещества:

$$\mathrm{v}_x = \mathrm{v}_y = \mathrm{v}_z = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0. \quad (6)$$

На свободной поверхности жидкости ставились условия недеформируемости, граница считалась свободной от касательных напряжений (равенство нулю нормальной компоненты скорости и касательных напряжений) и условие отсутствия потока вещества:

$$(\vec{v}\,\vec{n}) = 0, \quad (\overline{\overline{\sigma}}\vec{\tau}) = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0. \tag{7}$$

На границах расчетной области, которые являются продолжением пористой среды, задаются «мягкие» граничные условия – равенство нулю производных по нормали:

$$\frac{\partial v_i}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0. \tag{8}$$

Входная граница расчетной области располагается, как правило, перпендикулярно основному потоку, на ней задаются скорость потока V и концентрация примеси:

$$v_x = V, \quad v_y = v_z = 0, \quad c = c_0. \tag{9}$$

На выходе расчетной области ставились условия баланса массы и непрерывности потока вещества:

$$\int_{S_{in}} \rho v_{in} dS - \int_{S_{out}} \rho v_{out} dS = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = const. \tag{10}$$

На основании данных полевых измерений на входной границе расчетной области принято условие, что характерная концентрация аммоний-иона в грунтовых водах вблизи хранилища составляет минимум ~ 10 г/л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проведенного исследования выполнено трехмерное численное моделирование динамики распространения загрязняющих веществ в системе «озера-накопители (поверхностные водные объекты) и источники жидких отходов (подземные воды)».

Для моделирования брали часть геологической среды, представляющую параллелепипед длиной 2000 м, шириной 1400 м, глубиной 12 м (рис. 1). Рассматривался процесс фильтрации воды с содержанием азота аммонийного. На входе расчетной области задавалась постоянная скорость потока 10^{-7} м/с в водоносном слое толщиной 7 м проницаемостью 1e–13 м^2, 1e–08 м/с в слое над водоносным горизонтом толщиной 5 м проницаемостью 1e–14 м^2. Пористость горных пород принималась равной 0,2. В начальный момент времени задавалось нулевое значение для концентрации во всей расчетной области.

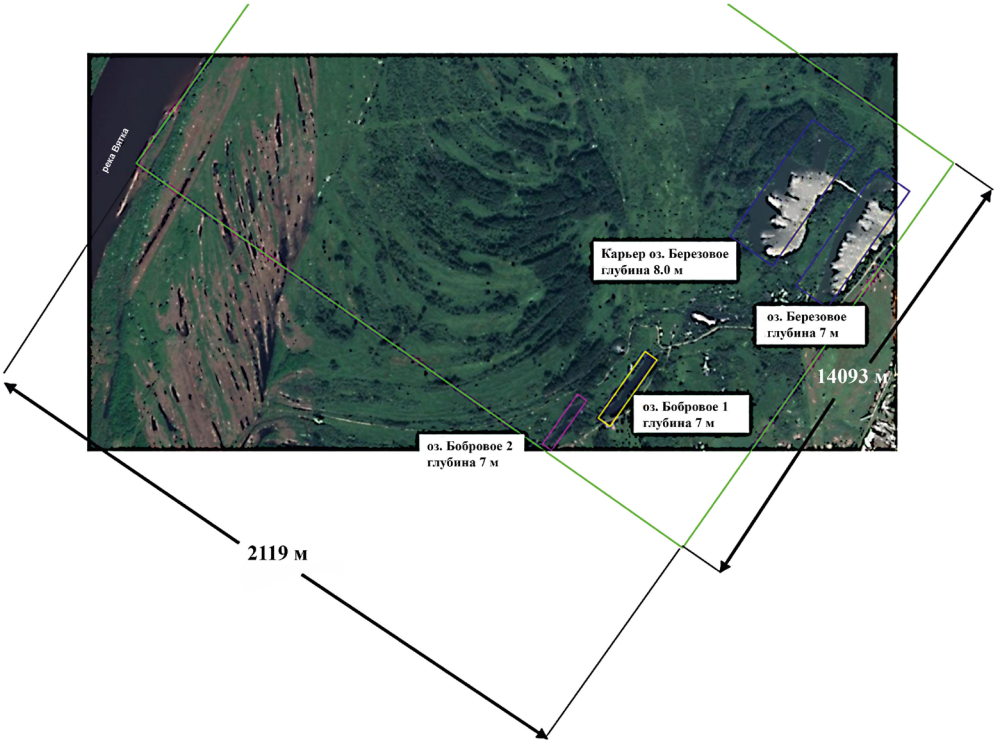


Рис. 1. Расчетная область
Fig. 1. Area to be calculated

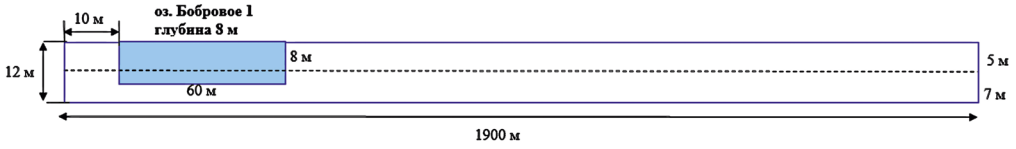


Рис. 2. Вертикальное сечение от оз. Бобровое 1 до р. Вятки
Fig. 2. Vertical section from the Lake Bobrovoe 1to the Vyatka River

С целью детального исследования пространственно-временной эволюции антропогенного загрязнения гидрогеологической системы были визуализированы и проанализированы двумерные поля концентрации загрязняющих веществ в центральном вертикальном сечении оз. Бобровое 1 (рис. 2), соответствующие различным ключевым моментам моделирования. Полученные графические материалы позволяют проследить динамику процесса от начального проникновения до формирования устойчивого загрязненного потока. На рис. 3, в свою очередь, представлена поэтапная, во временном разрезе, миграция загрязняющих веществ в системе грунтовых вод, непосредственно связанных с озером, что раскрывает механизм взаимодействия поверхностного водоема и подземной гидросферы.

Проведенный анализ накопленных данных однозначно свидетельствует о том, что начальное проникновение концентрационного фронта загрязнения из грунтовых вод в водную толщу озера выступает в роли триггера, иници-

ирующего развитие интенсивных конвективных течений. Эти течения вызваны возникновением значительных градиентов плотности: более плотная вода, обогащенная растворенными веществами, начинает опускаться, вытесняя и перемешивая менее плотные придонные воды. Данный физический процесс катализирует и многократно интенсифицирует вертикальное и горизонтальное перемешивание водной массы, что приводит к резкому, практически скачкообразному, росту концентрации аммонийного азота во всем объеме озера за чрезвычайно короткий по геоэкологическим меркам интервал – всего несколько месяцев. Таким образом, итогом описанного конвективного механизма является качественный переход экосистемы озера из состояния потенциального приемника загрязнения в статус активного, устойчивого источника вторичного загрязнения для окружающей среды.

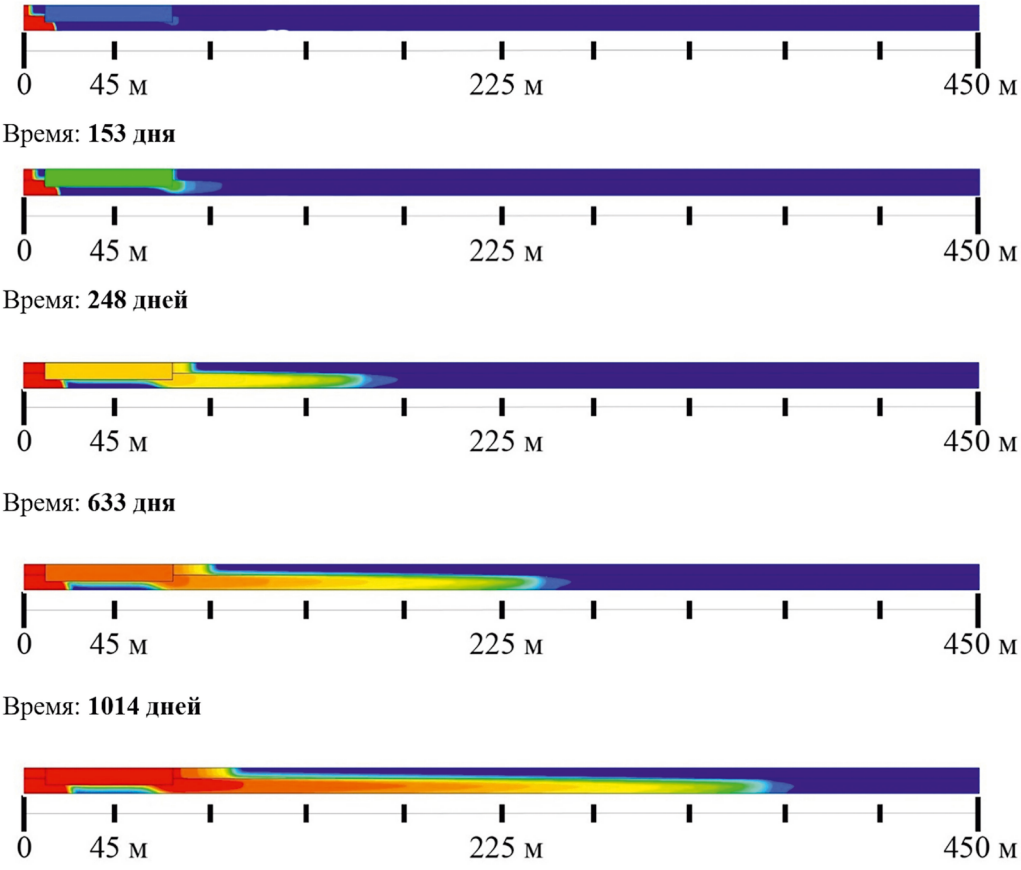


Рис. 3. Временная эволюция поля концентрации азота аммонийного в вертикальном сечении посередине оз. Бобровое 1. Шкала представлена в г/л
Fig. 3. Evolution in time of the ammonium nitrogen concentration in the vertical section in the middle of the Lake Bobrovoe 1. The scale is presented in g/l

Скорость продвижения исходного концентрационного фронта от места фильтрации из хранилища через геологическую среду относительно невелика и составляет величину порядка 10^(–6) м/с. В абсолютных значениях это означает, что за первые три месяца моделирования зона загрязнения распространяется в грунтах примерно на 1 м. Однако ситуация кардинально меняется при достижении фронтом водного объекта с неизолированными, проницаемыми берегами, каким является оз. Бобровое 1.

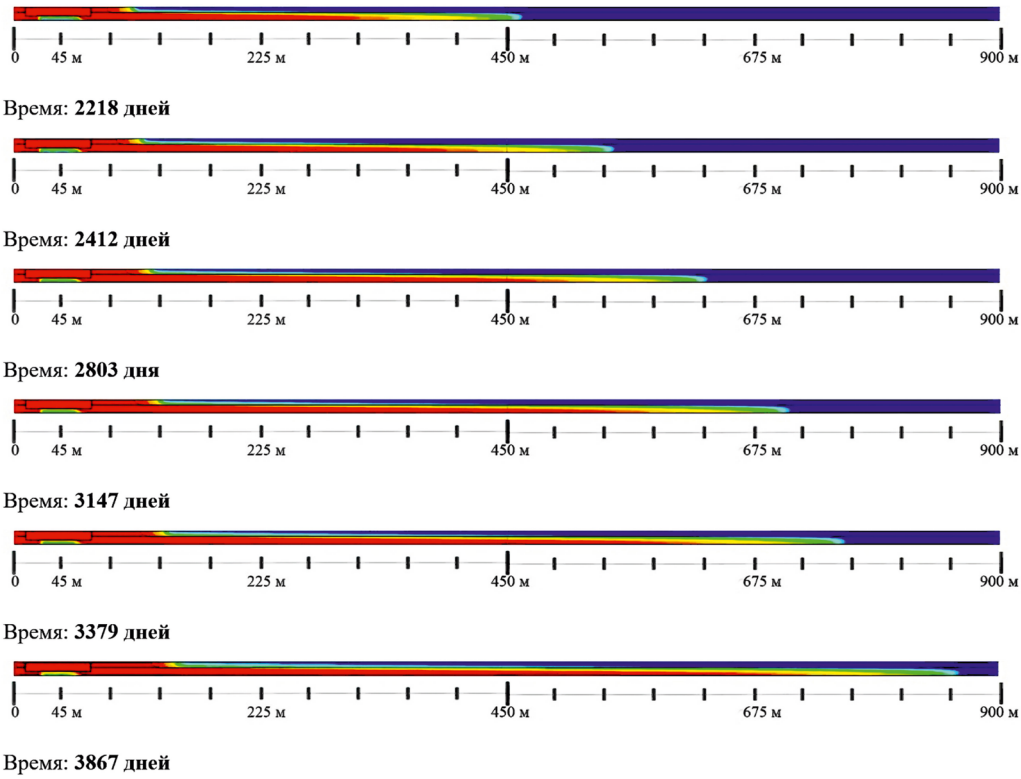


Рис. 4. Временная эволюция поля концентрации рассолов в вертикальном сечении посередине оз. Бобровое 1 через шесть лет от начала расчетов
Fig. 4. Temporal evolution of the brine concentration field in a vertical section in the middle of Lake Bobrovoe 1 six years after the start of calculations

В этом случае возникает двунаправленный процесс: загрязняющая примесь начинает активно распространяться из озера по водоносному горизонту, одновременно продолжая накапливаться в самой озерной воде. В результате уже спустя шесть месяцев после момента достижения концентрационным фронтом береговой линии озера ареал загрязнения в грунтовых водах расширяется до 15 м от уреза воды, а концентрация в эпицентре выброса достигает высоких значений, порядка 4 г/л, что наглядно отображено на рис. 3.

Для оценки долгосрочных и крупномасштабных последствий на рис. 4 представлено поле концентрации в вертикальном сечении, проходящем через

центр оз. Бобровое 1, в масштабе всей расчетной области (горизонтальный охват 0–900 м) после шести лет с момента начала миграции примеси. Визуализация демонстрирует, что сформировавшийся мощный шлейф загрязнения продолжает устойчиво распространяться в пределах водоносного слоя грунтовых вод, следуя региональному гидродинамическому градиенту. Полученная модель указывает на необратимость и значительную пространственную протяженность воздействия, превращая локальный источник в региональную экологическую угрозу для всей связанной гидрологической системы.

На основе полученных данных проведена оценка увеличения количества азота аммонийного в озерах за 100 дней, получено $5 \cdot 10^3$ т.

Рассмотрен также случай, когда в начальном состоянии имелось линейное распределение примеси от 10 г/л до 0 г/л на расстоянии 400 м (рис. 5*а*).

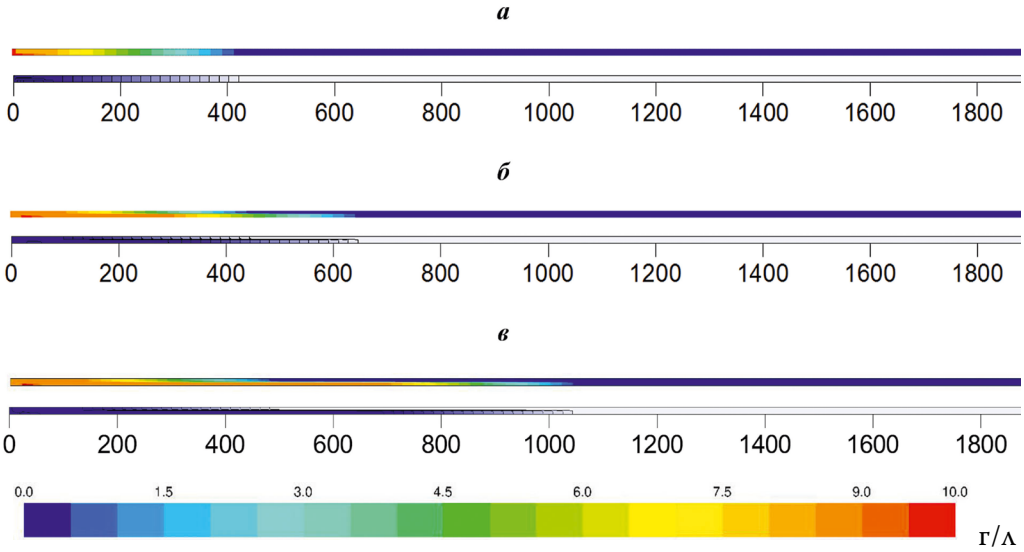


Рис. 5. Распределение фронта концентрации: *а* – начальное распределение концентрации, t = 0; *б* – распределение концентрации через t = 1029 дней (2 года 9 мес.); *в* – распределение концентрации через t = 2878 дней (7 лет 10 мес.)
Fig. 5. The concentration front distribution: *а* is the original concentration distribution, t = 0; *б* is the concentration distribution after t = 1029 days (2 years and 9 months); *в* is the concentration distribution after t = 2878 days (7 years and 10 months)

Показано, что при постоянном поступлении примеси с концентрацией 10 г/л ее объем в озере не меняется и составляет 10 г/л. Фронт концентрации при этом за 2 года 9 месяцев распространяется на 210 м (рис. 5*б*) и преодолевают расстояние в километр за семь с половиной месяцев (рис. 5*в*).

Разработанная трехмерная гидродинамическая модель, учитывающая диффузию примеси в пористой среде и концентрационно-конвективный перенос, применена для исследования формирования диффузного загрязнения. Модель корректно воспроизводит влияние плотностной стратификации, что критически важно при прогнозировании миграции высокоминерализованных

растворов и не может быть достигнуто с помощью упрощенных двумерных или гидростатических постановок. Расчеты для участка оз. Бобровое 1 продемонстрировали механизм формирования «отложенного» загрязнения. Установлено, что пойменные озера, аккумулируя поступающие из геологической среды загрязняющие вещества (в частности, аммонийный азот), приводят к усилению распространения диффузного загрязнения. Моделирование количественно показало, что наличие такой аккумулирующей емкости (озера) ускоряет распространение фронта загрязнения в водоносном горизонте на порядок (с ~ 1,5 м/полгода до ~ 15 м/полгода), значительно усугубляя экологическую ситуацию.

Полученные прогнозные картины пространственно-временного распространения загрязнения, оценка интенсивности поступления азотсодержащих соединений (например, увеличение на $5{\cdot}10^3$ т за 100 дней в рассмотренном сценарии) легли в основу разработки конкретных природоохранных мероприятий. Эти меры направлены как на локализацию и снижение диффузного стока, так и на обеспечение стабильного нормативного качества воды в ключевом объекте – Корчемкинском водозаборе г. Кирова.

ВЫВОДЫ

В формировании гидрохимического режима водных объектов и прилегающих к ним территорий существенную роль играют плотностные стратификационные эффекты, обусловливаемые неоднородностью распределения полей минерализации. При концентрации тяжелого элемента более одного промилле эти эффекты оказывают большое влияние на характер потока. Такие эффекты не могут быть описаны с помощью гидродинамических моделей в рамках уравнений мелкой воды, для их корректного описания необходимо использование гидродинамических моделей в полной трехмерной негидростатической постановке. В связи с этим актуальна разработка гидродинамических моделей, описывающих транспорт загрязнений и позволяющих прогнозировать изменения экологической обстановки в течение длительных периодов. Также важной задачей является оценка влияния на гидросферу полигонов бытовых и промышленных отходов ввиду их больших размеров и высоких рисков проникновения загрязнений в грунтовые воды с осадками и талыми водами.

В представленной работе исследовано формирование гидрохимического режима водных объектов и прилегающих к ним территорий с существенной ролью плотностных стратификационных эффектов, обусловленных неоднородностью распределения полей минерализации. При концентрации тяжелого элемента более одного промилле эти эффекты оказывают большое влияние на характер потока. Путем численного моделирования исследован процесс формирования диффузного загрязнения в бассейне р. Вятки, индуцированный се-

зонной промывкой пойменных водоемов (затопленных карьеров, озер) в зоне влияния Кирово-Чепецкого промышленного узла. Основное внимание уделено оценке объемов и динамики поступления соединений азота, в частности аммонийного азота.

Моделирование учитывало инфильтрацию загрязненных осадков через геологическую среду от накопителей твердых отходов. Установлено, что концентрационный фронт мигрирует в водоносном горизонте мощностью 7 м и проницаемостью $1 \cdot 10^{-13}$ м^2 со скоростью фильтрационного потока $1 \cdot 10^{-7}$ м/с. При выходе этого фронта к акватории пойменного озера активизируются процессы концентрационно-конвективного переноса, приводящие к интенсивному перемешиванию водной массы. В результате за период в несколько месяцев происходит значительное накопление аммонийного азота, трансформирующее озеро из потенциального приемника в активный вторичный источник загрязнения.

Ключевым выводом является различие в скорости распространения загрязняющих веществ. В поровом пространстве грунтов фронт продвигается со скоростью ~ $1 \cdot 10^{-7}$ м/с, что соответствует 1,5 м за полгода. Однако при поступлении в открытый водоем с незащищенными берегами, где включаются механизмы конвективного переноса и боковой миграции, зона влияния расширяется на расстояние до 15 м за тот же период после достижения фронтом уреза воды. Таким образом, наличие гидравлически связанных с подземным потоком озер приводит к увеличению скорости распространения загрязнения.

Описание применения генеративной модели: Программы на основе искусственного интеллекта не привлекались.

Description of a generative model application: Artificial intelligence-based programs were not used.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филимонов В. Ю., Ловцкая О. В. Полуэмпирический метод расчета диффузного стока консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек. Сообщение 2. Влияние числа измерений на результаты расчета обратной задачи // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 5–18. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-5-18
2. Alekseenko V. A., Maximovich N. G., Alekseenko A. V. Geochemical Barriers for Soil Protection in Mining Areas // Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils. 2017. P. 255–274. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809588-1.00009-8

3. О состоянии окружающей среды Кировской области в 2024 году. Региональный доклад / под ред. Т. Э. Абашева. Киров, 2025. 195 с.
4. Адамович Т. А., Скугорева С. Г., Кантор Г. Я., Ашихмина Т. Я. Экологическое состояние природного комплекса на территории вблизи Кирово-Чепецкого химического комбината // Проблемы региональной экологии. 2010. № 3. С. 197–205.
5. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд. М.: Недра, 1998. 366 с.
6. Шварцев С. Л. Созидательная функция воды в формировании окружающего нас мира // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1275–1291. https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0395
7. Особенности формирования и масштаб диффузного загрязнения пойменных озер в районе Кирово-Чепецкого промышленного комплекса / Ю. С. Ляхин, А. В. Богомолов, А. П. Лепихин, А. А. Возняк // Горное эхо. 2020. № 2 (79). С. 3–10. https://doi.org/10.7242/echo.2020.2.1
8. Лепихин А. П., Ляхин Ю. С. Влияние «отложенных» загрязнений на формирование гидрохимического режима водных объектов (на примере промышленного комплекса г. Кирово-Чепецк) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 3. С. 58–69. https://waterjournal.ru/files/wj/1621841371.pdf
9. Клецкина О. В., Красильников П. А., Татаркин А. В. Гидрогеохимическая оценка состояния поверхностных вод и выделение зоны влияния объекта размещения отходов в пределах Кирово-Чепецкого промышленного комплекса // Вестник Пермского университета. Геология. 2022. Т. 21. № 2. С. 180–189. https://doi.org/10.17072/psu.geol.21.2.180
10. Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Motusova G. N., Burachevskaya M. V., Nazarenko O. G., Sushkova S. N., Kizilkaya R. Heavy metal compounds in a soil of technogenic zone as indicate of its ecological state // Eurasian Journal of Soil Science. 2014. Vol. 3. No. 3. P. 144–151. https://doi.org/10.18393/ejss.60429
11. De Jonge L. W., Kjaergaard C., Moldrup P. Colloids and Colloid-Facilitated Transport of Contaminants in Soils: An Introduction // Vadose Zone Journal. 2004. Vol. 3. No. 2. P. 321–325. https://doi.org/10.2113/3.2.321
12. De Jonge L. W., Kjaergaard C., Moldrup P. Colloids and Colloid-Facilitated Transport of Contaminants in Soils // Vadose Zone Journal. 2004. Vol. 3. No. 2. P. 321–325. https://doi.org/10.2136/vzj2004.0321
13. Xie X., Wang Y., Ellis A., Li J., Su C., Duan M. Multiple isotope (O, S and C) approach elucidates the enrichment of arsenic in the groundwater from the Datong Basin, northern China // Journal of Hydrology. 2013. Vol. 498. P. 103–112. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.024
14. Zheng C., Bennett G. D. Applied Contaminant Transport Modeling. 4th ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2020.
15. Berkowitz B., Dror I., Yaron B. Contaminant Geochemistry. Berlin: Springer, 2008. 412 p.
16. Polubarinova-Kochina P. Ya. Theory of Ground Water Movement. Princeton: Princeton University Press, 1962. 613 p.
17. Bear J., Cheng A. H.-D. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. Amsterdam: Springer, 2010. 834 p.
18. Anderson M. P. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. New York: Academic Press, 1992. 381 p.
19. Lepikhin A. P., Lyubimova T. P., Parshakova Ya. N., Tiunov A. A. Discharge of excess brine into water bodies at potash industry works // Journal of Mining Science. 2012. Vol. 48. No. 2. P. 390–397. https://doi.org/10.1134/S1062739148020220
20. Nield D. A., Bejan A. Convection in Porous Media. 4th ed. Berlin: Springer, 2013. 778 p.
21. Lyubimova T. P., Zubova N. A. Nonlinear Regimes of the Soret-Induced Convection of Ternary Fluid in a Square Porous Cavity // Transport in Porous Media. 2019. Vol. 127. No. 3. P. 559–572. https://doi.org/10.1007/s11242-018-1211-2

REFERENCES

1. Filimonov V. Yu., Lovtskaya O. V. Semi-empirical method for calculating the diffuse runoff of conservative pollutants in sections of small lowland rivers. Report 2. Influence of the number of measurements on the results of calculating the inverse problem. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 2. P. 5–18. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-5-18
2. Alekseenko V., Maximovich N., Alekseenko A. Geochemical Barriers for Soil Protection in Mining Areas. *Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils.* 2017. P. 255–274. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809588-1.00009-8
3. About the state of Kirov Oblast environment in 2024. Regional report / edited by T. E. Abashev. Kirov, 2025. 195 p.
4. Adamovich T. A., Skugoreva S. G., Kantor G. Ya., Ashikhmina T. Ya. Ecological state of the natural complex in the area near the Kirovo-Chepetsk Chemical Plant. *Problems of Regional Ecology.* 2010. No. 3. P. 197–205.
5. Shvartsev S. L. Hydro/geochemistry of the hypergenesis zone. 2nd ed. M.: Nedra, 1998. 366 p.
6. Shvartsev S. L. The creative function of water in the formation of the world around us. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018. Vol. 9. No. 4. P. 1275–1291. https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0395
7. Lyakhin Yu. S., Bogomolov A. V., Lepikhin A. P., Voznyak A. A. Features of the formation and scale of diffuse pollution of floodplain lakes in the area of the Kirovo-Chepetsk industrial complex. *Mining Echo*. 2020. No. 2 (79). P. 3–10. https://doi.org/10.7242/echo.2020.2.1
8. Lepikhin A. P., Lyakhin Yu. S. The influence of "deferred" pollution on the formation of the hydrochemical regime of water bodies (on the example of the industrial complex of Kirovo-Chepetsk). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2011. No. 3. P. 58–69. https://waterjournal.ru/files/wj/1621841371.pdf
9. Kletskina O. V., Krasilnikov P. A., Tatarkin A. V. Hydro/geochemical assessment of surface water condition and identification of the influence zone of a waste disposal facility within the Kirovo-Chepetsk industrial complex. *Bulletin of Perm University.* Geology. 2022. Vol. 21. No. 2. P. 180–189. https://doi.org/10.17072/psu.geol.21.2.180
10. Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Motusova G. N., Burachevskaya M. V., Nazarenko O. G., Sushkova S. N., Kizilkaya R. Heavy metal compounds in a soil of technogenic zone as indicate of its ecological state. *Eurasian Journal of Soil Science.* 2014. Vol. 3. No. 3. P. 144–151. https://doi.org/10.18393/ejss.60429
11. De Jonge L. W., Kjaergaard C., Moldrup P. Colloids and Colloid-Facilitated Transport of Contaminants in Soils: An Introduction. *Vadose Zone Journal.* 2004. Vol. 3. No. 2. P. 321–325. https://doi.org/10.2113/3.2.321
12. De Jonge L. W., Kjaergaard C., Moldrup P. Colloids and Colloid-Facilitated Transport of Contaminants in Soils. *Vadose Zone Journal.* 2004. Vol. 3. No. 2. P. 321–325. https://doi.org/10.2136/vzj2004.0321
13. Xie X., Wang Y., Ellis A., Li J., Su C., Duan M. Multiple isotope (O, S and C) approach elucidates the enrichment of arsenic in the groundwater from the Datong Basin, northern China. *Journal of Hydrology.* 2013. Vol. 498. P. 103–112. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.024
14. Zheng C., Bennett G. D. Applied Contaminant Transport Modeling. 4th ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2020.
15. Berkowitz B., Dror I., Yaron B. Contaminant Geochemistry. Berlin: Springer, 2008. 412 p.
16. Polubarinova-Kochina P. Ya. Theory of Ground Water Movement. Princeton: Princeton University Press, 1962. 613 p.
17. Bear J., Cheng A. H.-D. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. Amsterdam: Springer, 2010. 834 p.
18. Anderson M. P. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. New York: Academic Press, 1992. 381 p.

19. Lepikhin A. P., Lyubimova T. P., Parshakova Ya. N., Tiunov A. A. Discharge of excess brine into water bodies at potash industry works. *Journal of Mining Science.* 2012. Vol. 48. No. 2. P. 390–397. https://doi.org/10.1134/S1062739148020220
20. Nield D. A., Bejan A. Convection in Porous Media. 4th ed. Berlin: Springer, 2013. 778 p.
21. Lyubimova T. P., Zubova N. A. Nonlinear Regimes of the Soret-Induced Convection of Ternary Fluid in a Square Porous Cavity. *Transport in Porous Media.* 2019. Vol. 127. No. 3. P. 559–572. https://doi.org/10.1007/s11242-018-1211-2

Сведения об авторах:

Любимова Татьяна Петровна, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией вычислительной гидродинамики, ФГБУН «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» (ИМСС УрО РАН), Россия, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; https://orcid.org/0000-0002-8212-2890; e-mail: lubimova@psu.ru

Паршакова Янина Николаевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» (ИМСС УрО РАН), Россия, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; https://orcid.org/0000-0002-0234-3854; e-mail: parshakova@icmm.ru

About the authors:

Tatyana P. Lyubimova, Professor, Doctor of Physical/Mathematical Sciences, Head of the Computational Fluid Dynamics Laboratory, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMSS UB RAS), 1, Akad. Korolev St., Perm, 614013, Russia; https://orcid.org/0000-0002-8212-2890; e-mail: lubimova@psu.ru

Yanina N. Parshakova, Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMSS UB RAS), 1, Akad. Korolev St., Perm, 614013, Russia; https://orcid.org/0000-0002-0234-3854; e-mail: parshakova@icmm.ru

Поступила в редакцию / Received 01.11.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 25.11.2025.
Принята к публикации / Accepted 14.01.2025.