

УДК 502.05,502.5,504.05,556
doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-6-76-84

ОЦЕНКА РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ НАПОРНЫХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ НА ТЕРРИТОРИЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОГРЕБЕННЫХ ЭРОЗИОННЫХ ВРЕЗОВ НА ПРИМЕРЕ г. МОСКВЫ

Ирина Алексеевна Позднякова¹✉, Сергей Павлович Поздняков²,
Ирина Васильевна Галицкая³

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия; irina_pozd58@mail.ru✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; sppozd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2932-4565>

³ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия; galgeoenv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2510-0297>

Аннотация. Разработана методика вероятностной оценки и картирования риска загрязнения артезианских водоносных горизонтов, основанная на расчетах времени вертикальной миграции поступающих с поверхности загрязняющих веществ, анализе пространственной корреляции и стохастическом моделировании его величин. Для территории г. Москвы создан макет карты вероятности риска загрязнения подольско-мячковского горизонта нефтепродуктами, поступающими в результате вертикальной миграции из надьюрского водоносного горизонта.

Ключевые слова: подземные воды, гидрогеологические окна, загрязнение, стохастическое моделирование

Для цитирования: Позднякова И.А., Поздняков С.П., Галицкая И.В. Оценка риска загрязнения напорных водоносных горизонтов на территориях распространения погребенных эрозионных врезов на примере г. Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 6. С. 76–84.

ASSESSMENT OF THE RISK OF CONTAMINATION OF CONFINED AQUIFERS IN THE AREAS OF BURIED EROSION SPREADING ON THE EXAMPLE OF MOSCOW CITY

Irina A. Pozdniakova¹✉, Sergey P. Pozdniakov², Irina V. Galitskaya³

¹ Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS, Moscow, Russia; irina_pozd58@mail.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; sppozd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2932-4565>

³ Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS, Moscow, Russia; galgeoenv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2510-0297>

Abstract. The methodology of probabilistic assessment and mapping of the risk of pollution of artesian aquifers based on calculations of the travel time of vertical migration of pollutants coming from the surface, analysis of spatial correlation and stochastic modeling of its values has been developed. For the territory of Moscow, a model of the map of probability of risk of contamination of the Podolsko-Myachkovskii Carboniferous aquifer with oil products coming as a result of vertical migration from the Meso-Cenozoic aquifer was created.

Keywords: groundwater, hydrogeological windows, pollution, stochastic modeling

For citation: Pozdniakova I.A., Pozdniakov S.P., Galitskaya I.V. Assessment of the risk of contamination of confined aquifers in the areas of buried erosion spreading on the example of Moscow city. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 6: 76–84. (In Russ.).

Введение. Проблема оценки вероятности относительно быстрой миграции загрязнения является одной из ключевых при обосновании безопасности захоронения токсичных отходов в глубоких водоносных горизонтах, оценке области захвата водозаборами подземных вод и при решении других прикладных задач, связанных с расчетами конвективного переноса контаминаントов в подземных водах. Во многом именно с этой проблемой ассоциирован термин «предпочтительные пути фильтрации» — «preferential flow path» [Preferential..., 2014]. В различных гидрогеологических условиях возникновение таких путей объясняется особенностями строения водовмещающей среды, но так или иначе эти осо-

бенности отражают влияние геофильтрационной неоднородности разного масштаба на поле скорости движения подземных вод.

В артезианских бассейнах платформенного типа зона интенсивного водообмена представлена чередованием относительно проницаемых горизонтов — водоносных пластов, разделенных относительными глинистыми водоупорами. При анализе защищенности напорных водоносных горизонтов от проникающего с поверхности загрязнения решающую роль в ее оценке играет пространственная неоднородность проницаемости перекрывающих водоупоров [Шестаков, 2003], в частности наличие в них относительно высокопроницаемых участков —

фильтрационных окон. Именно фильтрационные окна различного генезиса могут быть кандидатами на формирование предпочтительных путей фильтрации и миграции по ним загрязнения. Их наличие в условиях нисходящего движения подземных вод повышает уязвимость относительно защищенных от загрязнения с поверхности напорных водоносных горизонтов. При оценке роли фильтрационных окон в водоупорных отложениях на пути миграции загрязнения возникает проблема, связанная с тем, что, как правило, не все окна на территории исследований могут быть идентифицированы в процессе полевых работ из-за ограниченности объемов этих работ. Это требует вероятностной формулировки проблемы оценки риска проникновения загрязнения в целевые водоносные горизонты через фильтрационные окна по относительно ограниченной выборке данных об их проявлениях.

Как правило, для количественной оценки риска как вероятностной меры потерь используют произведение вероятности наступления нежелательного события на величину возможного ущерба от него [Галицкая и др., 2018]. В данной работе под нежелательным событием подразумевается проникновение загрязнения из надьюрского в подольско-мячковский водоносный горизонт, и при оценке риска рассматривается только вероятность наступления этого события как составляющая риска.

Оценка риска проникновения загрязнения с поверхности в подольско-мячковский водоносный горизонт в каменноугольных известняках является актуальной задачей из-за наличия связанных с древними эрозионными врезами фильтрационных окон в перекрывающей его толще, сформировавшейся в результате длительного понижения уровня горизонта нисходящей вертикальной фильтрации, наличия источника загрязнения в верхней части гидрогеологического разреза — надьюрского водоносного горизонта, важной роли подольско-мячковского горизонта в водоснабжении Московского региона.

Относительно большое количество фактических данных, полученных при изысканиях на территории Москвы о строении разделяющей надьюрский водоносный горизонт и подольско-мячковский горизонт толщи, позволяет для достижения поставленной цели применять классический геостатистический подход, основанный на вариограммном анализе, кrigинг-интерполяции и вероятностном условном моделировании случайных полей для оценки риска загрязнения.

Объект исследований. Подольско-мячковский водоносный горизонт, приуроченный к залегающим на глубине от 40 до 150 м и более от поверхности земли известнякам средне- и верхнекаменноугольного возраста, является резервным источником питьевого водоснабжения г. Москвы. В перекрывающей подольско-мячковский горизонт толще выделяется надьюрский водоносный комплекс в четвертичных и меловых рыхлых отложениях, региональный

слабопроницаемый пласт в келловей-оксфордских глинах, водоносные горизонты и слабопроницаемые пласти в верхнекаменноугольных известняках и глинах соответственно. Уровни подземных вод в каменноугольных отложениях повсеместно устанавливаются ниже, чем в «надьюрском» водоносном комплексе, что создает гидродинамические предпосылки нисходящей вертикальной миграции загрязняющих веществ. Подземные воды надьюрского водоносного комплекса загрязнены хлоридами, нефтепродуктами, ионом аммония, фенолами, ПАВ, органическими соединениями. В подольско-мячковском водоносном горизонте наблюдается превышение нормативов качества по минерализации, нефтепродуктам, иону аммония, перманганатной окисляемости [Галицкая и др., 2015].

Миграция загрязнения происходит через разделяющую надьюрский и подольско-мячковский горизонты толщу, строение которой характеризуется резкой неоднородностью и зависит от близости к древним эрозионным врезам. Миграция затруднена на удаленных от врезов территориях, где суммарная мощность слабопроницаемых верхненюрских и верхнекаменноугольных глин в перекрывающей толще более 50 м к северу от современной долины р. Москвы и более 40 м к югу. В бортах эрозионных врезов в перекрывающей подольско-мячковский водоносный горизонт толще сокращается количество и мощность слабопроницаемых пластов, вплоть до полного отсутствия и формирования с надьюрским единственным водоносным горизонтом в осевой части врезов [Позднякова и др., 2012]. Для оконтуривания таких участков быстрой вертикальной миграции загрязнения из надьюрского водоносного комплекса в подольско-мячковский горизонт (гидрогеологических окон) в Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН) в 2014 г. была составлена «Карта границ гидрогеологических окон» в масштабе 1:10 000 для территории г. Москвы [Галицкая и др., 2015].

Методика картирования была основана на расчетах времени вертикальной миграции загрязнения из надьюрского в подольско-мячковский горизонт по известной зависимости, предложенной В.М. Гольдбергом для оценки защищенности от загрязнения подземных вод в слоистой толще [Гольдберг, 1987]. Для одного слоя, через который идет вертикальная миграция, эта зависимость имеет следующий вид:

$$t = \frac{m_0^2 n_0}{k_0 (H_1 - H_2)}, \quad (1)$$

где m_0 , k_0 , n_0 — мощность, коэффициент фильтрации и активная пористость слабопроницаемых отложений; напор подземных вод водоносного горизонта: H_1 — надьюрского, H_2 — каменноугольного.

При наличии в толще, разделяющей надьюрский и подольско-мячковский горизонты, нескольких водоносных горизонтов и разделяющих слабопро-

нициаемых слоев рассчитывается время миграции загрязнения через каждый разделяющий слой, и результаты суммируются.

Расчетные значения времени составили от 400 сут до 100 и более лет. На участках единого водоносного горизонта в четвертичных и каменноугольных отложениях, выявленных и оконтуренных при создании серии тематических геологических крупномасштабных карт территории г. Москвы в масштабе 1 : 10 000 [Миронов, 2011; Осипов, 2011], время фильтрации не рассчитывалось. Было принято, что оно не превышает 400 сут или года, что соответствует времени выживания патогенных микроорганизмов в подземных водах.

Технология картирования заключалась в построении цифровых моделей поверхностей, в которые были преобразованы все необходимые для расчета времени вертикальной фильтрации исходные данные — мощность, коэффициент фильтрации и активная пористость слабопроницаемых отложений, разделяющих водоносный горизонт, из которого происходит вертикальная миграция загрязняющих веществ, и залегающий ниже по разрезу водоносный горизонт, в который они поступают; разность напоров подземных вод этих горизонтов. В дальнейшем с этими поверхностями были выполнены вычислительные операции по расчету времени вертикальной миграции. Расчеты выполнялись в центрах равномерной сетки шагом 10 × 10 м, которой была покрыта вся территория. Контрольными и независимыми от интерполяции геологических границ считались результаты расчета времени в точках расположения порядка 1000 имеющих геологические паспорта изыскательских архивных скважин, пробуренных до кровли подольско-мячковского водоносного горизонта. Границы гидрогеологических окон проводились по изолиниям характерного времени с применением метода кригинг-интерполяции [Галицкая и др., 2015; Миронов, 2011].

Методика. В качестве базовой переменной рассматривается время вертикальной миграции загрязняющих веществ из надфлюорского водоносного горизонта, рассчитанное для массива скважин по зависимости (1). Это время используется для вероятностной оценки и картирования риска проникновения загрязнения в подольско-мячковский горизонт. Подход к оценке и картированию риска загрязнения подземных вод заключается в применении геостатистического анализа и стохастического моделирования пространственного распределения значений этого времени.

Для геостатистического анализа используются только значения времени миграции, которые были рассчитаны в точках расположения глубоких скважин, т. е. там, где наиболее достоверны данные о мощности слабопроницаемых отложений и соотношении напоров подземных вод. Массив значений времени t (значение времени по 917 скважинам) и их пространственные координаты (x, y) в дальнейшем

рассматривается как регионализированная переменная $t = f(x, y)$.

Пространственный анализ этой переменной был выполнен методами геостатистики: вариограммного анализа, кригинг-интерполяции и стохастического моделирования [Бакшевская и др., 2012]. Стохастическое моделирование представляло из себя вероятностное моделирование планового случайного поля времени вертикальной миграции с известными статистическими параметрами и подобранный теоретической вариограммой. Моделирование обусловлено дискретным набором из 917 значений, рассчитанных по скважинам с заданными координатами. Условное моделирование регионализированной переменной проводилось на плановой сетке высокого разрешения при помощи программы свободного доступа SGeMS [Remy, 2004]. Затем результаты N реализаций условного моделирования времен миграции в каждом узле этой сетки рассматривались как вектор из N значений, и для каждого из этих векторов вычислялась вероятность превышения значений времени вертикальной миграции некоторых характерных заданных величин. Эта расчетная вероятность представляет собой риск проникновения загрязнения в подольско-мячковский водоносный горизонт за заданный характерный период времени. Таким образом была оценена вероятность проникновения загрязнения в подольско-мячковский горизонт за несколько выбранных характерных периодов времени и построены карты риска.

Результаты геостатистического анализа. В процессе геостатистического анализа проводилось построение и аппроксимация теоретическими моделями вариограмм времен вертикальной миграции загрязнения и кригинг-интерполяция распределения этих времен миграции на территории города. Поскольку интервал времен, оцененный по скважинам, менялся более чем на два порядка от сотен суток до сотен лет, то для геостатистического анализа использовались логарифмы времен, а не сами значения времени. Это преобразование позволило нормализовать массив из значений времени миграции загрязнения, рассчитанных по 917 скважинам, для дальнейшего геостатистического анализа. Интегральная кривая распределения времен показана на рис. 1, откуда следует, что визуально результаты в координатах вероятность и время миграции формируют прямую линию, т. е. логарифмирование действительно нормализует исходный массив расчетных времен миграции.

Вариограммный анализ выполнялся с целью поиска пространственной корреляции данных — зависимостей между дисперсией логарифмов времени миграции загрязнения и расстояний между парами точек и подборе наилучшего вида теоретической вариограммы и ее параметров, при которых она наилучшим образом совпадает с экспериментальной.

Было проведено сравнение экспериментальных вариограмм по направлениям с теоретическими

вариограммами, с учетом эффекта самородка, экспоненциальной и сферической зависимостей и эффекта самородка, эффекта волны и сферической зависимости. На рис. 2 в качестве примера приведена всенаправленная экспериментальная вариограмма и ее аппроксимация суммой теоретических моделей вариограмм: эффект самородка плюс экспоненциальная вариограмма и плюс волновая вариограмма.

Следует отметить, что обе теоретические модели аппроксимации экспериментальной вариограммы, как волновая, так и экспоненциальная, при автоматическом подборе с использованием метода наименьших квадратов показали выраженную геометрическую анизотропию. У обеих теоретических моделей с коэффициентом анизотропии горизонтального масштаба около 2 направление главной оси анизотропии равно 148° (направление 0 градусов — это север, поворот по часовой стрелке), то есть направление главной оси анизотропии экспериментальной вариограммы в целом совпадает с направлением долины р. Москвы в пределах города: с северо-запада на юго-восток.

Приведенные на рис. 2 теоретические модели вариограммы в дальнейшем использовались при кригинг-интерполяции данных для построения карт логарифмов времени миграции загрязнения, а экспоненциальная модель — и при стохастическом моделировании.

Кригинг-интерполяция. Теоретические модели вариограммы далее используются при кригинг-интерполяции данных и построении карт логарифмов времени миграции загрязнения и при стохастическом моделировании. Сравнение карт логарифмов времени, при построении которых для интерполяции значений были использованы обе теоретические

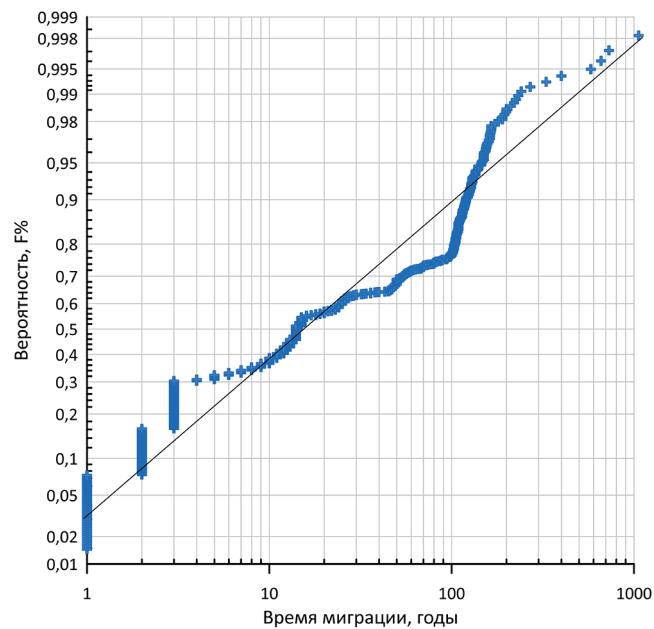


Рис. 1. Кривая распределения времен миграции: символы — эмпирическая интегральная кривая распределения расчетных времен миграции, линия — аппроксимация ее логнормальным распределением с параметрами: $M\{\lg(t)\} = 1,19$, $\sigma_{\lg(t)} = 0,71$

модели вариограммы, приведенные на рис. 2, показаны на рис. 3. В целом обе модели дают достаточно похожую картину пространственного распределения времен миграции, но вторая теоретическая модель немного точнее описывает ситуацию, так как зоны с минимальным значением времени в ней лучше совпадают с картой гидрологических окон [Галицкая и др., 2015].

Карты стандартных ошибок кригинга показали (рис. 4), что ошибки интерполяции в обоих случаях

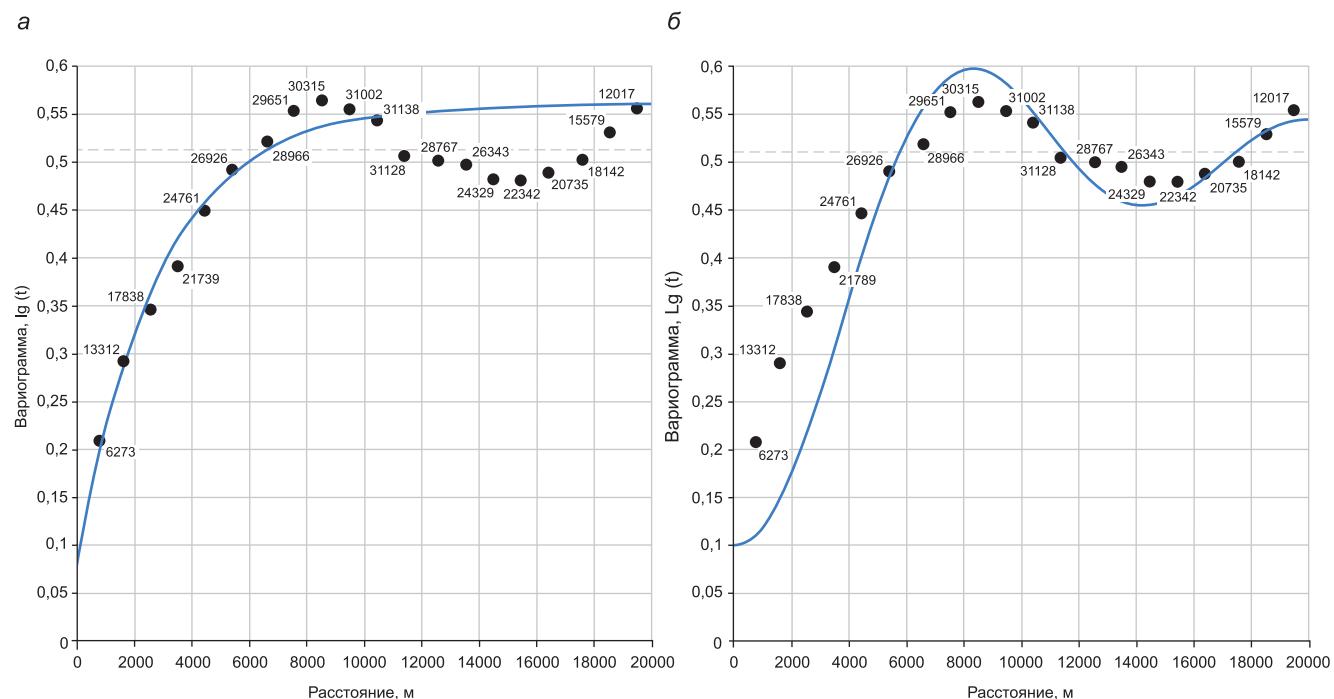


Рис. 2. Пример экспериментальной вариограммы (с точками) и ее аппроксимация (сплошная линия) теоретическими моделями: а — эффект самородка плюс экспоненциальная вариограмма, б — эффект самородка плюс волновая вариограмма

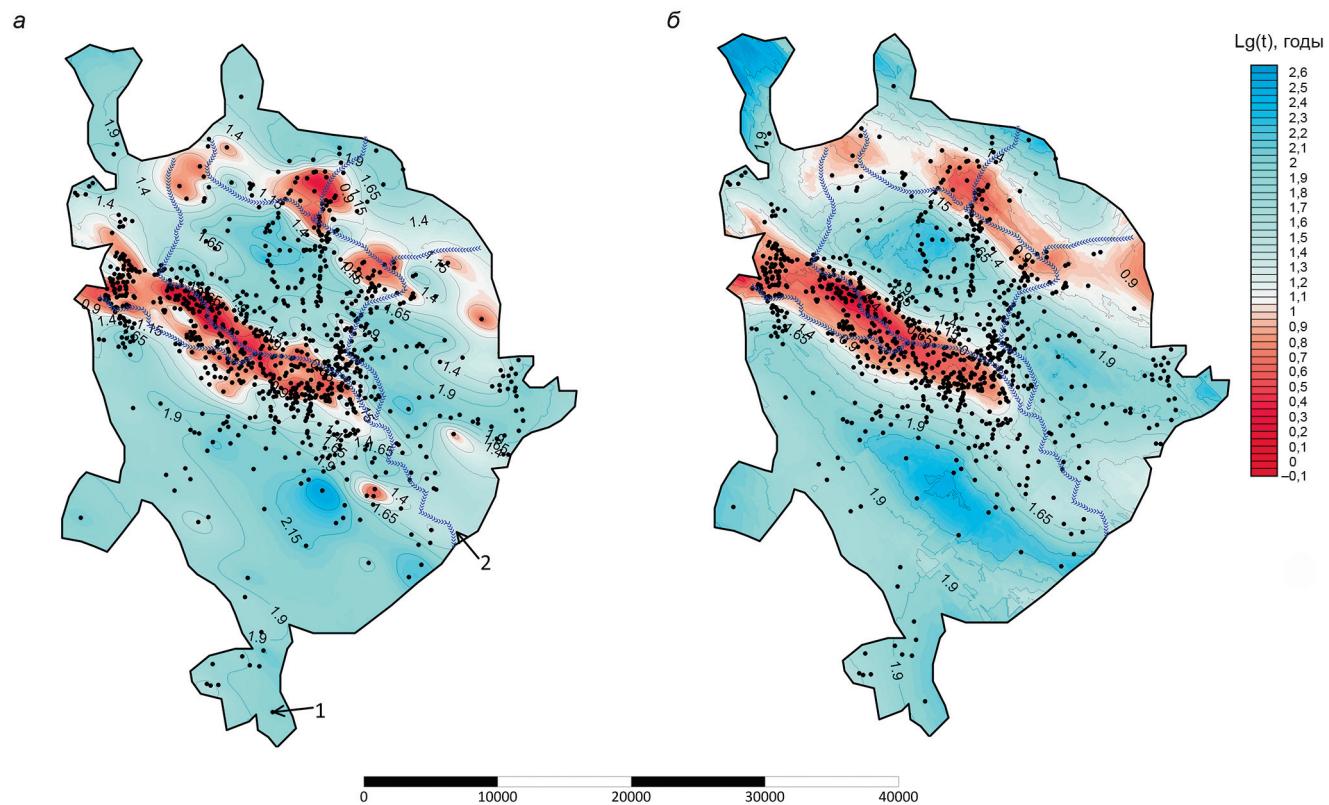


Рис. 3. Карты логарифмов времени миграции загрязнения: *а* — модель вариограммы сумма эффекта самородков и экспоненциальной зависимости; *б* — модель вариограммы сумма эффекта самородка и волновой зависимости; 1 — скважины с исходными данными для интерполяции; 2 — тальвеги древних погребенных эрозионных врезов [Осипов, 2011]

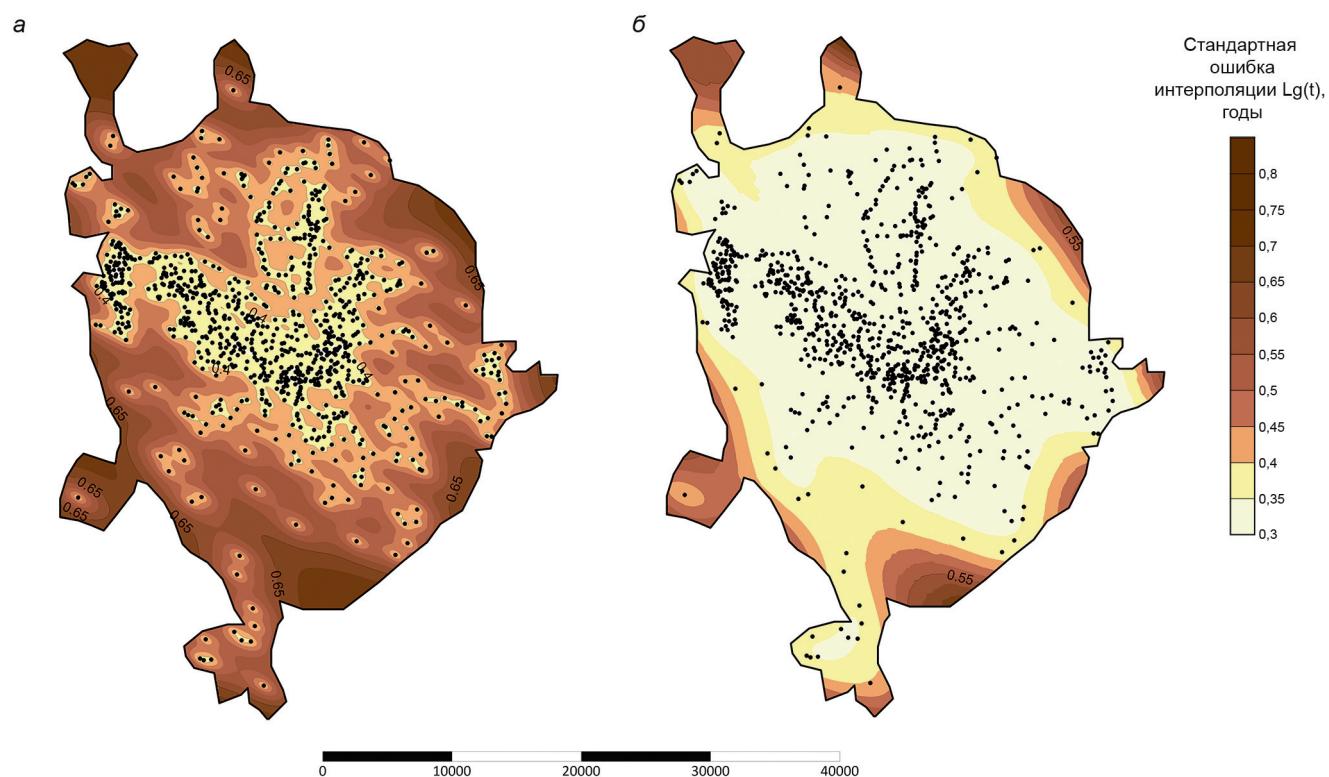


Рис. 4. Карты стандартных ошибок кригинга с использованием экспоненциальной модели вариограммы (*а*), с волновой вариограммой (*б*)

довольно большие, даже в областях концентрации точек с рассчитанными временами миграции. Это связано с тем, что обе теоретические модели включали эффект самородков, составлявший примерно 20 % от общей дисперсии логарифмов времен прихода. Однако при этом в целом ошибка волновой модели оказалась меньше, что, по-видимому, связано с тем, что она лучше описывает квазипериодическую структуру пространственной геологической изменчивости врезов, связанной с направлением палеодолин р. Москвы, Яузы и их притоков (рис. 3). Если взять минимальное значение времени миграции загрязнения 3 года ($\log 3 = 0,47$), то с учетом минимальной ошибки 0,3 логарифм времени миграции загрязнения составит $0,47 \pm 0,3$, а время может меняться в диапазоне от 1,3 до 6 лет. При такой неопределенности оценок необходимо стохастическое моделирование, позволяющее оценить вероятности.

Результаты стохастического моделирования. Риск загрязнения подольско-мячковского водоносного горизонта оценивается как вероятность того, что время проникновения загрязнения в подольско-мячковский горизонт из надьюрского через разделяющую слабопроницаемую толщу меньше некоторых характерных величин времени. В качестве этих характерных величин выбраны: примерное время полураспада нефтепродуктов — 3 года для оценки вероятности проникновения нефтепродуктов и характерное время работы водозабора подземных вод — 25 лет.

При стохастическом моделировании применялся следующий алгоритм: расчетная область была разделена на блоки размером 250×250 м (примерно 16 000 узлов), для центров блоков при помощи последовательного Гауссовского моделирования (SGSIM) в программе SGeMS были посчитаны 500 вариантов значений логарифмов времени вертикальной миграции загрязнения. При моделировании использовалась вариограмма, изображенная на рис. 2, а, а для получения в каждом варианте условной вероятности они все обуславливались расположением расчетных точек с известным временем миграции.

Для оценки риска загрязнения для центров блоков рассчитывалась вероятность того, что полученные значения логарифмов времени миграции загрязнения меньше выбранных характерных значений — 3 или 25 лет. Вероятность рассчитывалась как $N/500$, где N — число значений времени в блоке менее 3 или 25 лет. Например, из 500 значений времени 400 значений меньше 3 лет, вероятность $400/500$ или 0,8 (80 %). При этом были блоки, где все значения превышали 3 года (вероятность 0) или все меньше 3 лет (вероятность 1 или 100 %). Затем используя эту сетку строились карты изолиний вероятности того, что время миграции нефтепродуктов в подольско-мячковский водоносный горизонт менее 3 лет (периода их полураспада), и вероятности того, что время проникновения загрязнения менее 25 лет (характерного времени работы водозабора).

Примеры карт вероятности проникновения загрязнения в подольско-мячковский водоносный горизонт показаны на рис. 5.

Сравнение карт, построенных с вероятностной оценкой времени проникновения загрязнения в подольско-мячковский водоносный горизонт (рис. 5), и карты, построенной методом кригинг-интерполяции с учетом всех эффектов (самородка, волны и сферической зависимости), показало, что красные зоны с временем миграции загрязнения менее 3 лет (уязвимые к проникновению нефтепродуктов) на картах вероятностной оценки (рис. 5, а) и детерминированной (рис. 6) примерно совпадают. На карте, построенной методом кригинг-интерполяции (рис. 6), розовые зоны с временем миграции загрязнения менее 25 лет занимают меньшую площадь, чем на вероятностной карте, где они показаны красным цветом (рис. 5, б). Таким образом, стохастическое моделирование пространственно распределенных значений времени миграции загрязнения из надьюрского в подольско-мячковский водоносный горизонт позволяет выделить большие площади с высоким риском проникновения загрязнения по сравнению с полученными методом кригинг-интерполяции.

Такие же карты можно построить для других характерных времен миграции загрязняющих веществ — полураспада органических соединений, радиоактивных элементов и т.д.

Результаты стохастического моделирования связи площади подольско-мячковского горизонта с вероятностью времени проникновения загрязнения менее выбранных пороговых значений трех и 25 лет (рис. 7) показывают следующее: на 40 % площади распространения горизонта вероятность проникновения нефтепродуктов за три года близка к нулю; на 3 % площади составляет 0,5; и только на 1 % площади около 1, т. е. 100 % риск. Только на 2 % площади подольско-мячковского горизонта вероятность проникновения загрязнения за время менее 25 лет близка к 0; на 40 % площади составляет 0,5, на 5 % площади около 1.

Верификация результатов стохастического моделирования. Для верификации результатов стохастического моделирования были использованы данные мониторинга подземных вод ОАО Геоцентр-Москва за 2006–2007 гг. [Галицкая и др., 2015]. На этом этапе визуально сопоставлялось положение точек с максимальными концентрациями хлорид-иона — маркера загрязнения подземных вод подольско-мячковского горизонта и зон водоносного горизонта, в которых время вертикальной миграции загрязняющих веществ с высокой вероятностью составляет менее 25 лет. Сравнение показало, что максимальные концентрации хлорид-иона (более 200 мг/л) наблюдаются в осевой части эрозионного вреза (рис. 8), минимальные (фоновые 5 мг/л и менее) на удалении от него на юго-западе территории города. Положение участков с повышенной относительно фона концентрацией хлорид-иона в под-

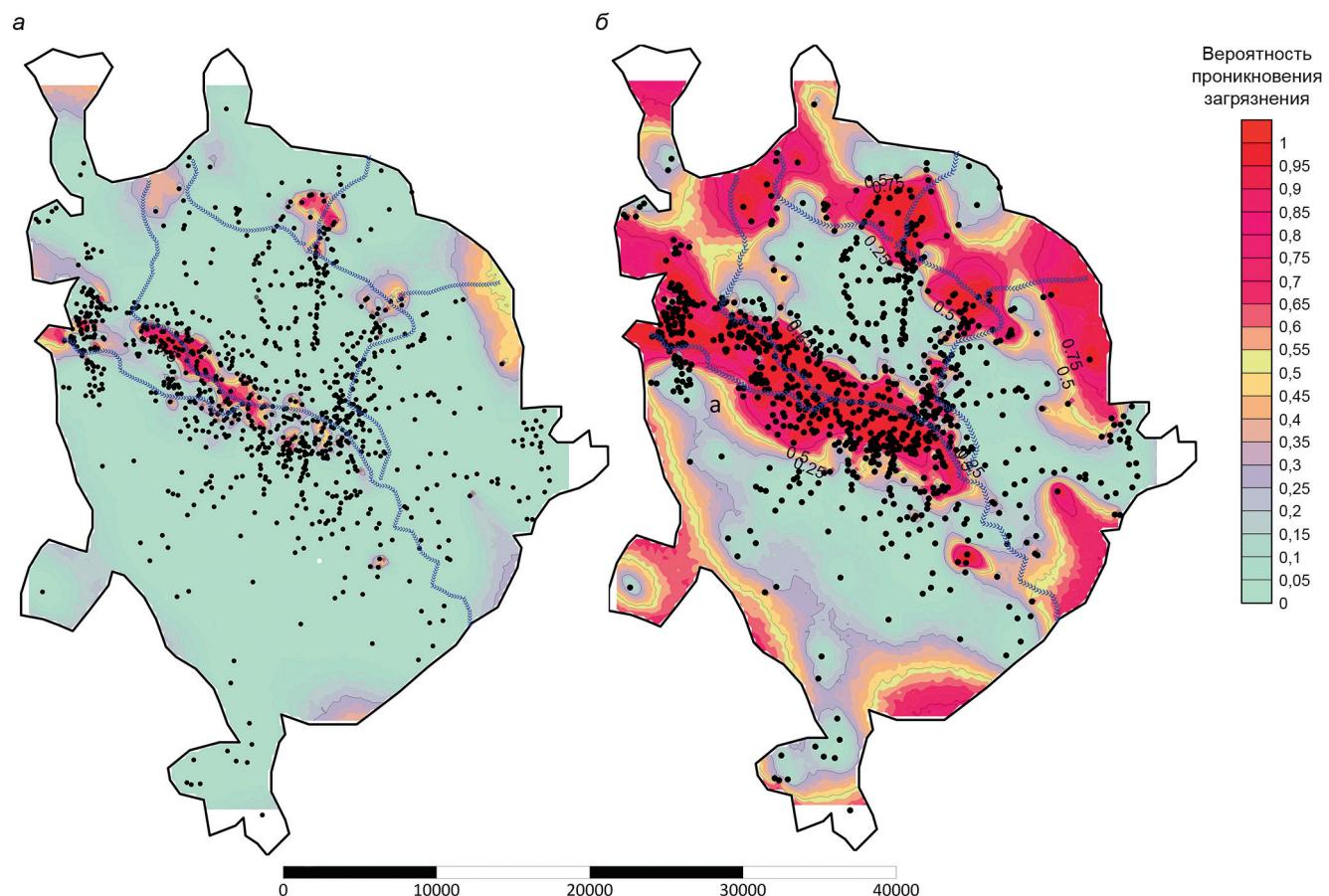


Рис. 5. Карта риска проникновения загрязнения в подольско-мячковский водоносный горизонт нефтепродуктов за период времени менее 3 лет (а) и загрязнения за 25 лет (б)

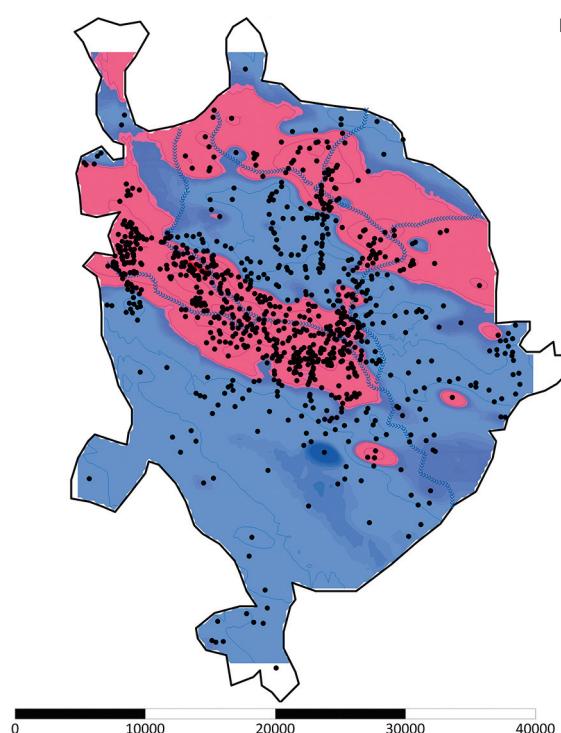


Рис. 6. Карта логарифма времени миграции загрязнения из надьюрского в подольско-мячковский водоносный горизонт, построенная методом кригинг-интерполяции

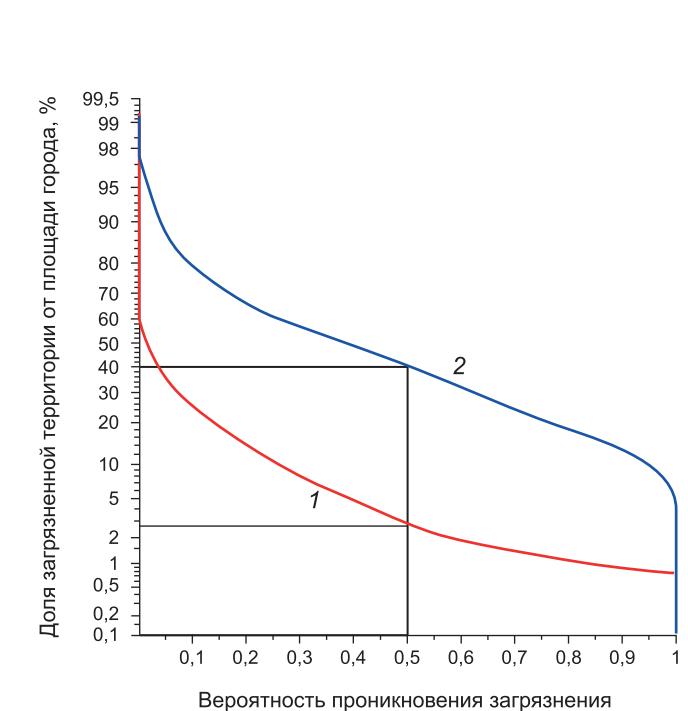


Рис. 7. Связь доли площади распространения подольско-мячковского горизонта с вероятностью проникновения загрязнения за заданный период времени по результатам стохастического моделирования: 1 — 3 года; 2 — 25 лет

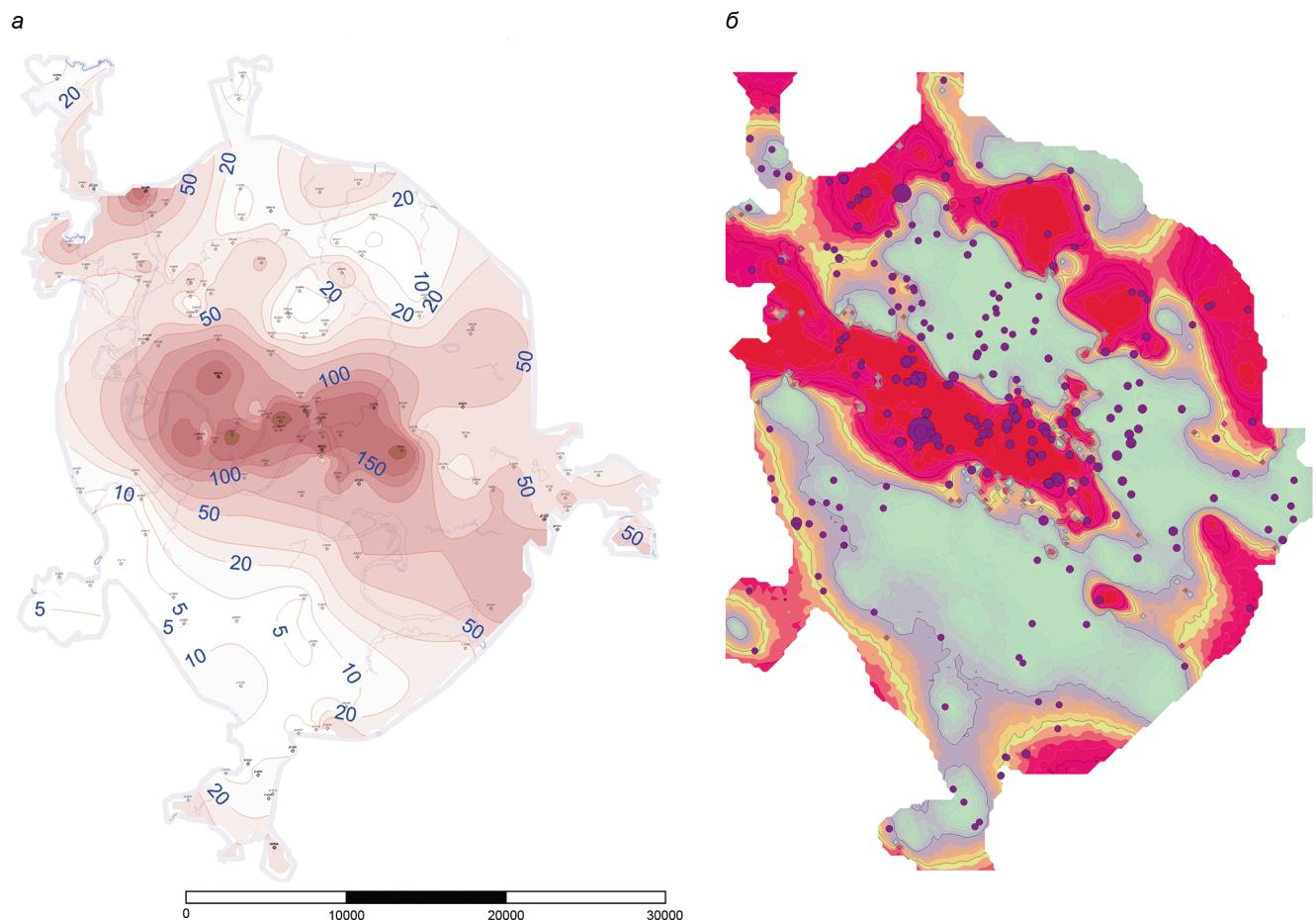


Рис. 8. Концентрации хлорид-иона в подземных водах подольско-мячковского горизонта по данным на 2006–2007 гг., мг/л: *а* — в изолиниях, *б* — в масштабированных символах на фоне карты риска проникновения загрязнения в подольско-мячковский водоносный горизонт за 25 лет

земных водах подольско-мячковского горизонта от 50 мг/л и более хорошо согласуется с картой риска проникновения загрязнения в подольско-мячковский водоносный горизонт за период расчетного времени работы водозабора — 25 лет, т. е. время проникновения загрязнения составляет менее 25 лет на этих участках с очень высокой до 80–90 % вероятностью.

Заключение. Особенностью территории, для которой выполнена оценка и картирование риска проникновения загрязнения в подольско-мячковский водоносный горизонт, является наличие древних эрозионных врезов, которые на относительно небольшой площади являются причиной резкой смены геологического строения и связанных с этим изменением гидрогеологических условий. В результате эрозионной деятельности на участках сокращения мощности и увеличения проницаемости слабопроницаемых отложений в толще, перекрывающей целевой исследуемый подольско-мячковский водоносный горизонт, формируются локальные области быстрого проникновения загрязнения с поверхности — гидрогеологические окна. Для территории характерна также неравномерная изученность геологического строения и гидрогеологических условий из-за крайне неравномерного расположения

изыскательских скважин как по площади, так и по глубине вскрытия разреза.

Традиционный детерминированный подход к картированию защищенности целевого горизонта, который использовался ранее при построении подобных карт, заключался в том, что значения времени миграции рассчитывались по скважинам, расположенным крайне неравномерно по области картирования, и затем проводилась интерполяция, модернизирован на стохастический путем использования геостатистического анализа и стохастического моделирования риска проникновения загрязнения.

Результаты оценки вероятности быстрого (менее чем за три года) проникновения загрязнения в подольско-мячковский горизонт показали: для 40 % территории города эта вероятность практически равна нулю; для 3 % около 0,5; для 1 % около 1.

Результаты оценки вероятности проникновения загрязнения в подольско-мячковский горизонт за время, сопоставимое с характерным временем расчетной эксплуатации водозабора подземных вод — 25 лет, показали: только для 2 % территории вероятность близка к 0; для 40 % составляет 0,5; для 5 % практически равна 1.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили весьма неоднородные в плане условия

формирования защищенности от проникновения загрязнения с поверхности подольско-мячиковского горизонта на территории г. Москвы и позволили построить в пределах исследуемой территории карты риска проникновения загрязнения, в которых области повышенного риска возникают в зонах предпочтительных путей миграции из надьюрского комплекса, генетически связанных с древними эрозионными врезами. Результаты исследований могут быть использованы для развития мониторинга качества подземных вод подольско-мячиковского водоносного горизонта на территории города и выбора местоположения объекта строительства с учетом

его потенциальной опасности для загрязнения подземных вод.

Финансирование. Настоящая работа подготовлена в рамках выполнения государственного задания по темам НИР FMWM-2025-0002, № 1022065000195-1.5.1. «Развитие теоретических и экспериментальных основ исследования и оценки подземных вод и сопредельных сред в условиях техногенеза» и AAAA-A16-116033010122-4. «Модели и методы исследований гидрогеологических процессов для рационального использования подземных вод в условиях техногенеза».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бакиевская В.А., Поздняков С.П. Методы моделирования геофильтрационной неоднородности осадочных отложений // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2012. № 6. С. 560–570.

Галицкая И.В., Миронов О.К., Позднякова И.А. и др. Выявление гидрогеологических окон на основе крупномасштабного картирования геологического строения и гидрогеологических условий территории г. Москвы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2015. № 4. С. 352–365.

Галицкая И.В., Позднякова И.А., Батрак Г.И. и др. Подходы к оценке риска загрязнения подземных вод на участках гидрогеологических окон // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2018. № 6. С. 83–94.

Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 247 с.

Миронов О.К. Геоинформационные технологии для составления крупномасштабных геологических карт территории Москвы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2011. № 3. С. 198–214.

Осипов В.И. Крупномасштабное геологическое картирование территории г. Москвы // Геоэкология. Инже-

нерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2011. № 3. С. 195–197.

Позднякова И.А., Кожевникова И.А., Костикова И.А. и др. Оценка условий взаимосвязи водоносных горизонтов на основе крупномасштабного картирования геологического строения и гидрогеологических условий г. Москвы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2012. № 6. С. 527–539.

Шестаков В.М. Учет геологической неоднородности — ключевая проблема гидрогеодинамики // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2003. № 1. С. 25–30.

Preferential Flow and Migration Zones in Geological Environment. In Groundwater Vulnerability / Eds. B. Faybushenko, T. Nicholson, V. Shestopalov, A. Bohuslavsky and V. Bublias. <https://doi.org/10.1002/9781118962220.ch3>, 2014.

Remy N. The Stanford Geostatistical Modeling Software, 2004. https://pangea.stanford.edu/departments/ere/dropbox/scrf/documents/reports/20/SCRF2007_Report20/SCRF2007_RemyBoucherWu_Book.pdf DOI: 10.1111/j.1745-6584.2008.00522.x

Статья поступила в редакцию 11.04.2025, одобрена после рецензирования 23.05.2025, принята к публикации 26.12.2025