

УДК 556.34

## ДВУМЕРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ И ПЕРЕНОС ЧЕРЕЗ ЗОНУ АЭРАЦИИ ИЗ ПОВЕРХНОСТНОГО ХРАНИЛИЩА ОТХОДОВ<sup>1</sup>

© 2020 г. И. А. Расторгуев<sup>a, b, \*</sup>

<sup>a</sup>Институт водных проблем РАН, ул. Губкина, 3, Москва, 119333 Россия

<sup>b</sup>НИИ Курчатовский институт, пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182 Россия

\*e-mail: stiar@mail.ru

Поступила в редакцию 28.05.2019 г.

После доработки 04.07.2019 г.

Принята к публикации 07.07.2019 г.

На основе численных расчетов в программной среде DHI FEFLOW проведена оценка влияния параметров зоны аэрации на формирование капиллярного барьера. Проведен анализ чувствительности модели к этим параметрам и даны условия вырождения барьера.

*Ключевые слова:* капиллярный барьер, моделирование, зона аэрации, среда моделирования FEFLOW.

DOI: 10.31857/S0321059620020145

### ВВЕДЕНИЕ

Существующие методики оценки защищенности подземных вод предполагают, что защищенность определяется наличием слабопроницаемых отложений в зоне аэрации – чем выше фильтрационные свойства пород зоны аэрации, тем ниже защищенность подземных вод [1]. Из-за зависимости коэффициента влагопереноса от всасывающего давления в области неполного насыщения (рис. 1) могут возникнуть более сложные условия движения потока воды. По рис. 1 видно, что при всасывающем давлении  $>5$  см значение коэффициента фильтрации гравия (грубозернистых отложений) меньше коэффициента фильтрации песка (мелкозернистых отложений).

Влияние зон неоднородности на движение фильтрационного потока в зоне аэрации может приводить к возникновению практически не обводненных (изолированных) участков, куда не поступает влага. Такой эффект отмечается в [4, 6] и именуется там капиллярным барьером. В работе [6] предлагается аналитическая оценка такого эффекта. Эта оценка позволяет рассчитать, при каких условиях капиллярные барьеры возникают и какие параметры оказывают существенное влияние на возникновение капиллярных барьеров.

### ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ О КАПИЛЛЯРНЫХ БАРЬЕРАХ

Описание применения капиллярных барьеров в полевых условиях приведено в [4]. При проведении работ на орошаемых сельскохозяйственных землях предварительно окрашивали поливную воду. Раскопки в зоне аэрации показали наличие множества зон повышенной обводненности небольшого размера ( $<1$  м) в мелкозернистых линзах, которые залегают над грубозернистыми песчаными отложениями. Значительные по размерам капиллярные барьеры обнаружены в горах Юкка Маунтин, Невада. Здесь проводились детальные исследования для захоронения радиоактивных отходов. В результате было показано, что в низко залегающих туфах с резкоменяющимися фильтрационными свойствами существуют капиллярные барьеры, площадь которых достигает сотен метров. Таким образом, для возникновения капиллярного барьера необходимо наличие наклонно-залегающего мелкозернистого слоя поверх грубозернистых отложений.

Для обоснования эффективности капиллярных барьеров Росс получил аналитическую формулу [6]. Решение было получено исходя из квазилинейной связи коэффициента фильтрации в зоне неполного насыщения со всасывающим давлением:

$$K = K_s e^{(\gamma h)}, \quad (1)$$

где  $K_s$  – коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя при полном насыщении,  $\gamma$  – кон-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-55-S52003).

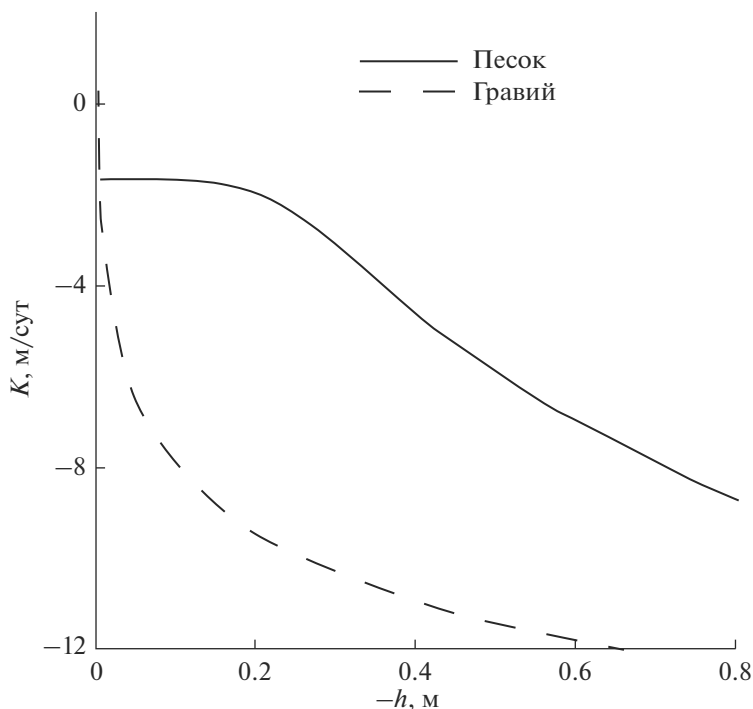


Рис 1. Зависимость коэффициента фильтрации  $K$  от всасывающего давления  $h$ .

станта квазилинейного уравнения,  $h$  – величина всасывающего давления.

Полученная Россом формула эффективности капиллярного барьера может быть представлена следующим образом:

$$L < \frac{\text{tg}\varphi}{\gamma q} (K_s - q), \quad (2)$$

где  $L$  – длина непроницаемого для воды капиллярного барьера,  $\varphi$  – угол наклона барьера,  $q$  – инфильтрационное питание.

Входящие в формулу (2) параметры  $K_s$ ,  $q$ ,  $\gamma$  относятся к верхнему мелкозернистому слою. Из формулы (2) следует, что капиллярный барьер существует, если:  $\varphi > 0$ ,  $q \ll K_s$ .

Фильтрацию и перенос веществ через зону аэрации часто приходится учитывать при прогнозах распространения загрязнения, связанного со свалками и поверхностными хранилищами отходов. Механизм миграции загрязнения в этом случае такой: загрязняющие вещества проходят через зону аэрации, поступают в подземные воды и далее вместе с ними разгружаются в поверхностные водоотки. Такая задача используется в качестве обучающей для программы VS2DT, основанной на методе конечных разностей с ортогональной дискретизацией [5]. Ее постановка использована для анализа чувствительности параметров зоны аэрации, который выполнен в программном ком-

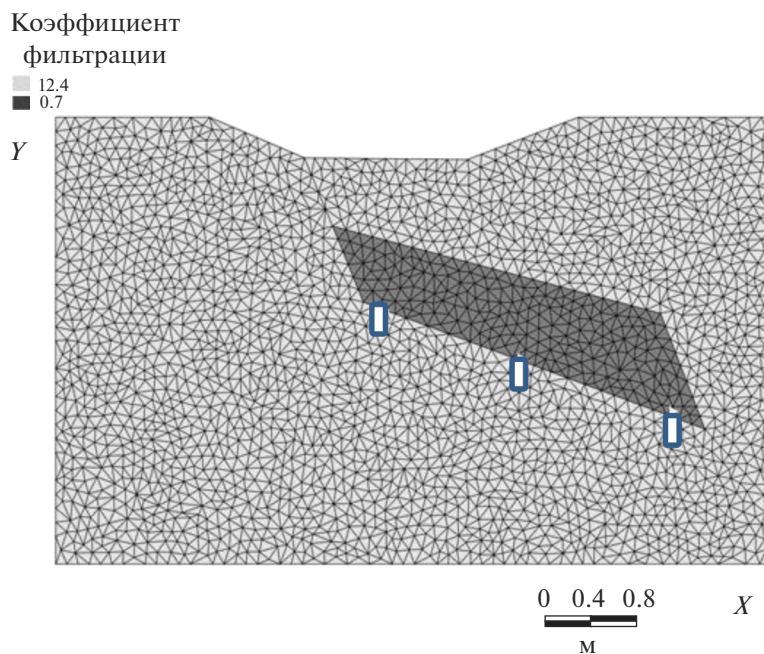
плексе Feflow 7.2 [3]. Для учета зоны аэрации использованы уравнения состояния Ван Генухтена [7].

Расчетный профиль задачи и конечно-элементная дискретизация модели представлены на рис. 2. Исследуемая область имеет размеры 6.47 на 4.06 м. Сетка, реализованная триангуляцией, содержит 4647 элементов и 2404 узла. Размеры стороны элемента изменяются от 0.05 до 0.14 м.

Как следует из рис. 2, зона аэрации сложена неоднородными отложениями. Красным цветом показаны хорошо проницаемые пески, синим – линза слабопроницаемых пылеватых грунтов с уклоном  $30^\circ$  (капиллярный барьер). Параметры зоны аэрации приведены в табл. 1. В левом и правом нижних углах модели задано граничное условие первого рода с напором  $-4.5$  м. Отметка  $-4.5$  м соответствует нулевому давлению. Выше этой отметки начальные давления заданы гидростатическими (рис. 3). На верхней границе задано инфильтрационное питание  $0.01$  м/сут. В углублении, которое можно интерпретировать как хранилище отходов, концентрация инфильтрата задана равной  $1000$  мг/л, в остальной области на верхней границе она равна нулю.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Результаты расчетов на 110-е сут в виде изолиний распределения давлений, напоров и насыщенностей представлены рис. 4–6. По рис. 4 видно, что проницаемость пылеватых грунтов оста-



**Рис. 2.** Дискретизация к задаче двумерной фильтрации, полученная с помощью средства для моделирования Feflow. Белые прямоугольники – положение пьезометров, по которым будет отслеживаться концентрация загрязнения. Светло-серая заливка – область песков, темно-серая заливка – область пылеватых грунтов.

ется более высокой, чем проницаемость песков, поскольку всасывающее давление под линзой пылеватых песков  $> 1$  м. Скорости влагопереноса наиболее интенсифицируются в низовой части барьера.

На профиле, изображенном на рис. 5, по разнице напоров видно, что влагоперенос в областях слева, сверху и справа от линзы происходит в основном через тело линзы пылеватых грунтов.

На рис. 6 приведено распределение насыщенности влагосодержания, из которого следует, что повышенное влагосодержание в крупнозернистом слое распространяется только на область в низовой части, где происходит протекание влаги через барьер.

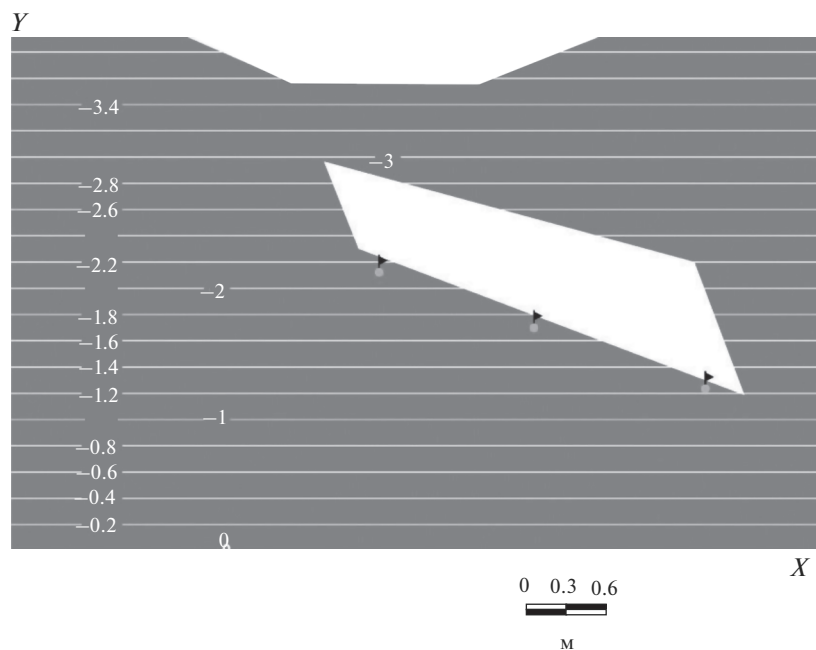
Распределение концентраций консервативного трассера (рис. 7) показывает, что область пыле-

ватых отложений в ненасыщенных условиях может быть основным коллектором переноса загрязняющих веществ в горизонтальном направлении. Под линзой пылеватых отложений грунтов может временно образовываться область, куда нет доступа загрязнению со стороны хранилища отходов.

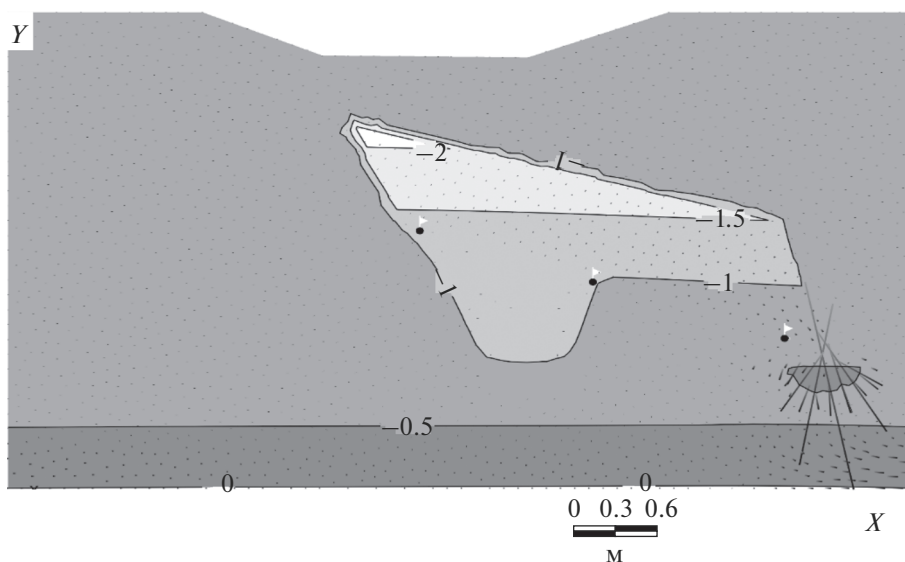
На рис. 2 показано расположение трех пьезометров, по которым отслеживается процесс изменения концентрации консервативного трассера во времени. Пьезометр 1 расположен под средней частью области пылеватых грунтов, пьезометр 2 – под верхней частью области пылеватых грунтов, пьезометр 3 – в нижней части области пылеватых грунтов. На рис. 8 показаны тренды изменения концентрации консервативного трассера от времени по пьезометрам 1–3.

**Таблица 1.** Параметры к двумерной задаче фильтрации и массопереноса

Параметр	Пески	Пылеватый грунт
Коэффициент фильтрации, м/сут	12.4	0.7
Пористость $\theta_s$	0.39	0.4
Минимальная влажность $\theta_r$	0.06	0.14
Параметр аппроксимации Ван Генухтена, $n$	5.8	7.0
Параметр аппроксимации Ван Генухтена, $\alpha$ 1/м	2.3	0.25
Продольная дисперсивность, $\alpha_L$ , м	0.1	0.1
Поперечная дисперсивность, $\alpha_T$ , м	0.01	0.01



**Рис. 3.** Начальное распределение давлений, белые линии – отметки по вертикали, белые цифры – значения отметок по вертикали. Темно-серая заливка – область песков, светло-серая заливка – область пылеватых грунтов.



**Рис. 4.** Расчетное распределение давлений на 110-е сут. Стрелками показаны векторы скоростей фильтрации; черные цифры – давление, серая заливка – распределение давления в метрах.

Долговременный расчет на 1100-е сут показывает, что барьер прорывается (рис. 9). Под линзой пылеватых отложений наблюдается загрязнение, концентрация которого равна концентрации в источнике загрязнения. Таким образом, капиллярный барьер не является 100%-й защитой залегающих под ним отложений от постоянно поступающей с поверхности влаги.

Для анализа влияния параметров зоны аэрации были получены результаты расчетов миграции консервативного трассера для слабопрони-

цаемой зоны со следующими измененными параметрами (табл. 2):

- коэффициент фильтрации пылеватого грунта равен коэффициенту фильтрации песков 12.4 м/сут;
- параметр аппроксимации  $\alpha$  пылеватого грунта равен 1.0 1/м;
- параметр аппроксимации  $n$  пылеватого грунта равен 5.8 1/м;
- уклон слабопроницаемой зоны  $0^\circ$ .

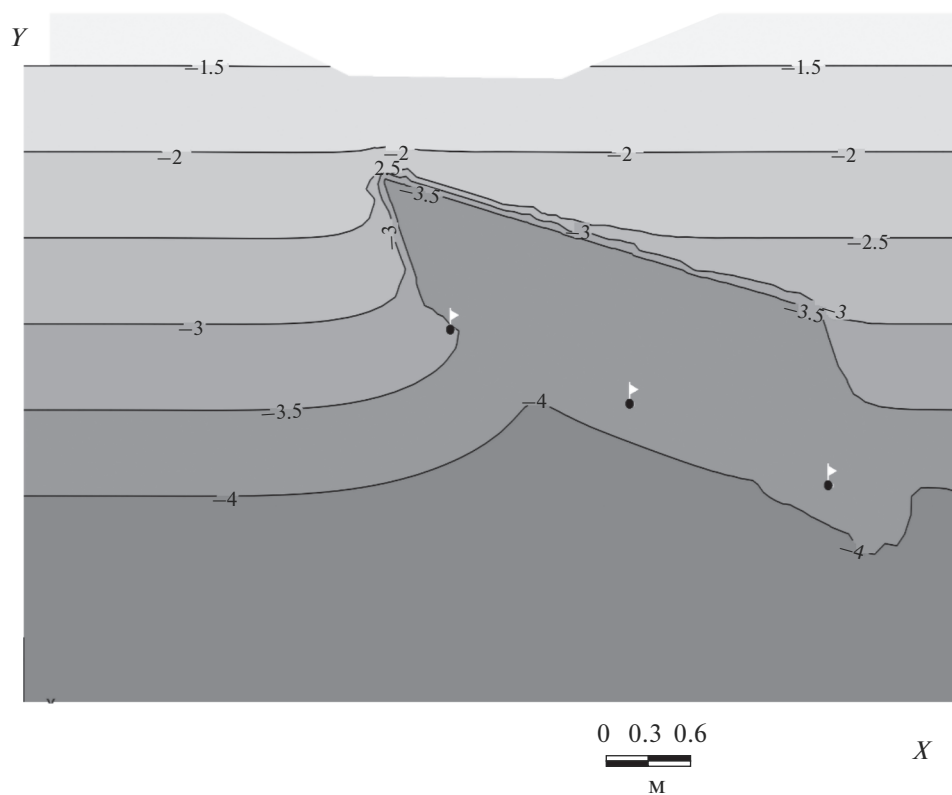


Рис. 5. Расчетное распределение напоров на 110-е сут. Изолинии напоров (м) показаны черными линиями, серой заливкой показано распределение напоров.

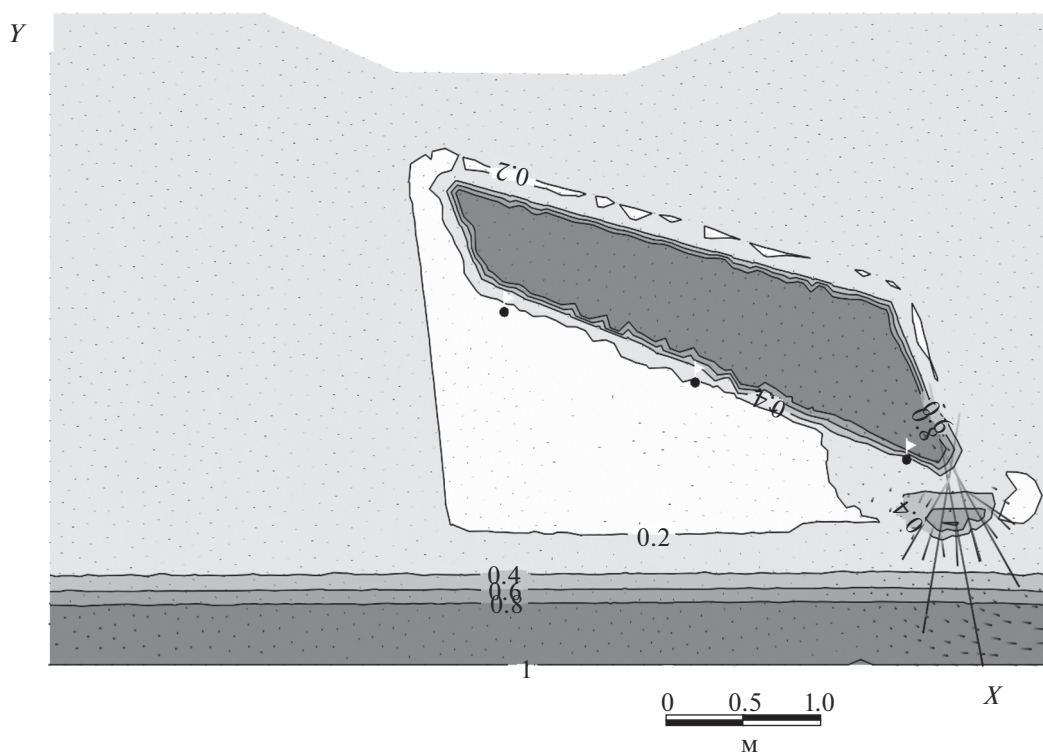


Рис. 6. Расчетное распределение насыщенности на 110-е сут. Черные цифры – насыщенность (безразмерная), серая заливка – распределение насыщенности.

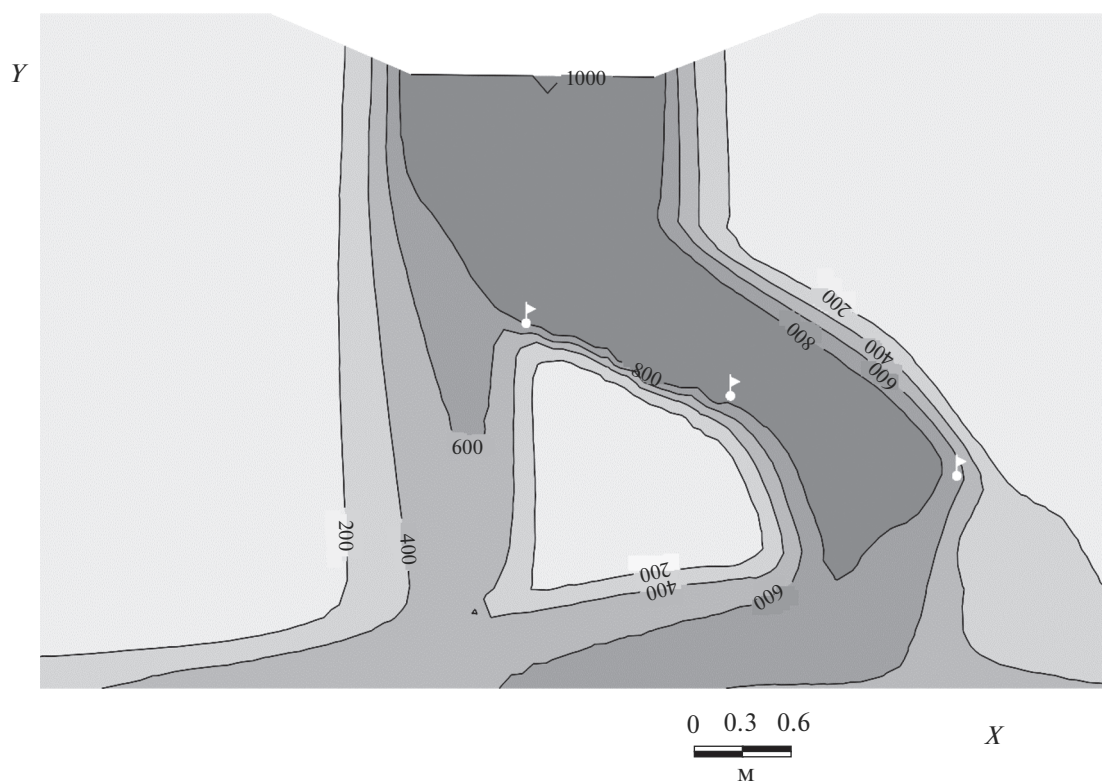


Рис. 7. Расчетное распределение концентраций консервативного трассера (мг/л) на 110-е сут. Черные цифры – концентрация, серая заливка – распределение концентрации.

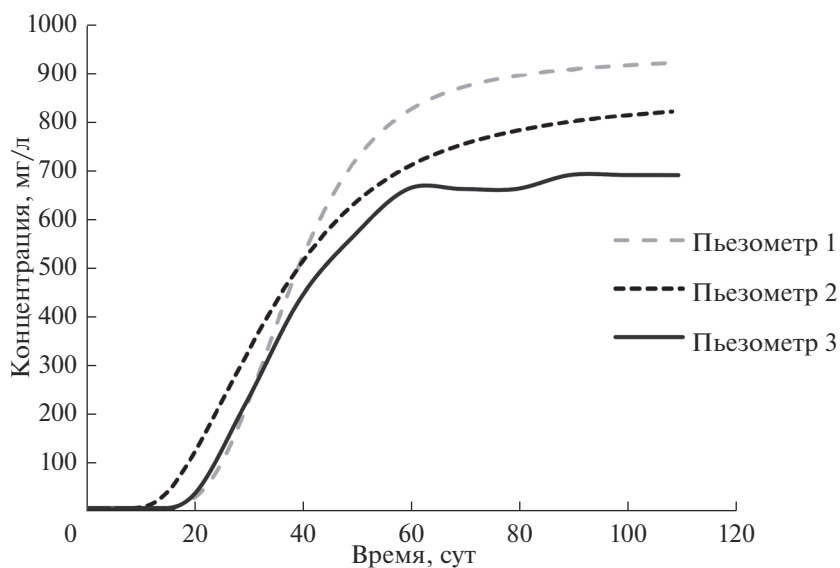


Рис. 8. Изменение концентрации в пьезометрах 1–3 для базового сценария.

Результирующее распределение консервативного трассера из хранилища отходов показано на рис. 10 и 11.

На рис. 10–12 приведены результирующие ореолы распределения консервативного трассера

из хранилища отходов. Базовый сценарий расчета показал, что фронт движения концентрации консервативного трассера на границе двух сред с разной проницаемостью имеет характерное направление вдоль линзы в соответствии с ее углом залегания.



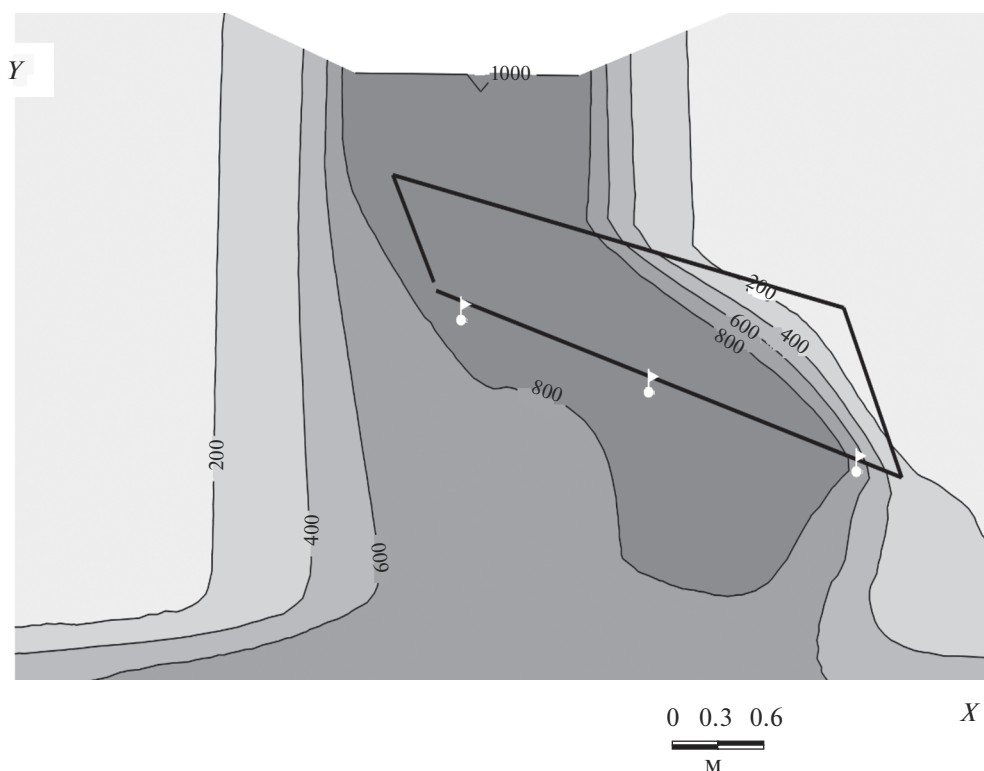
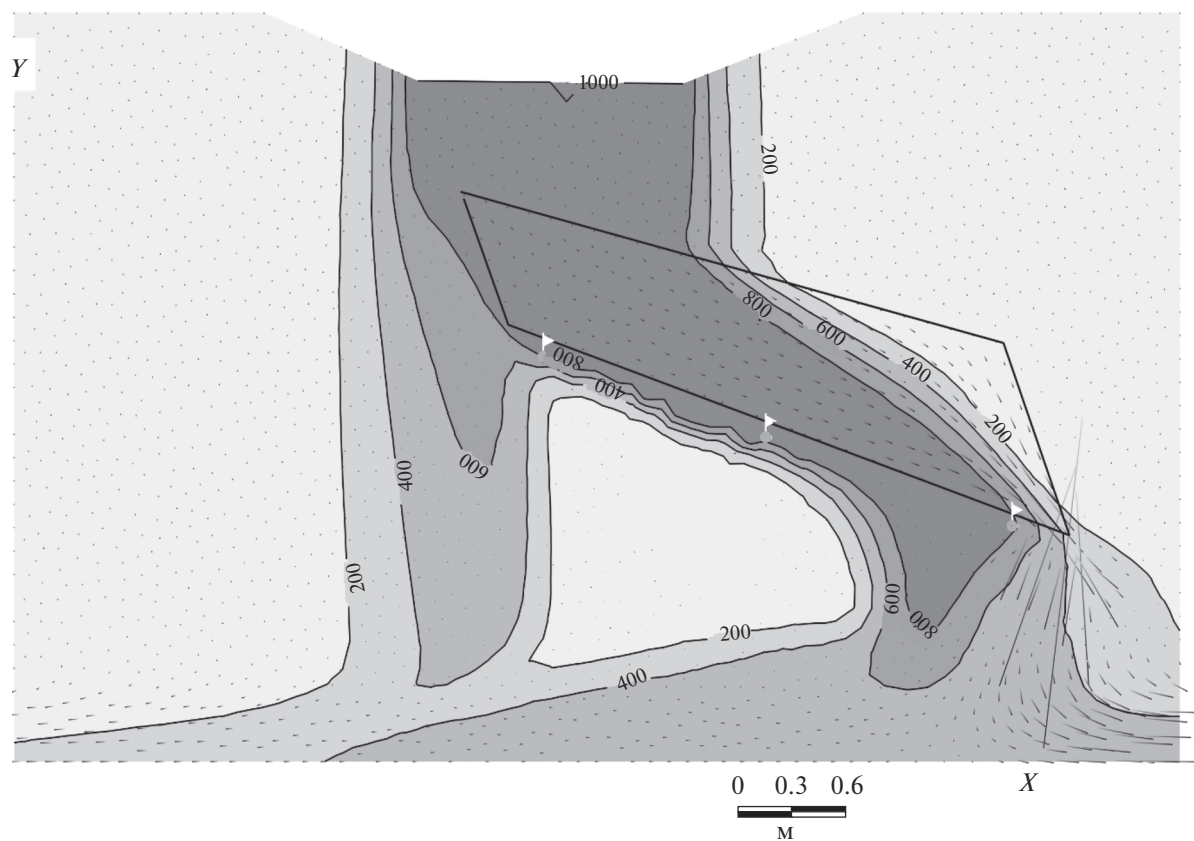


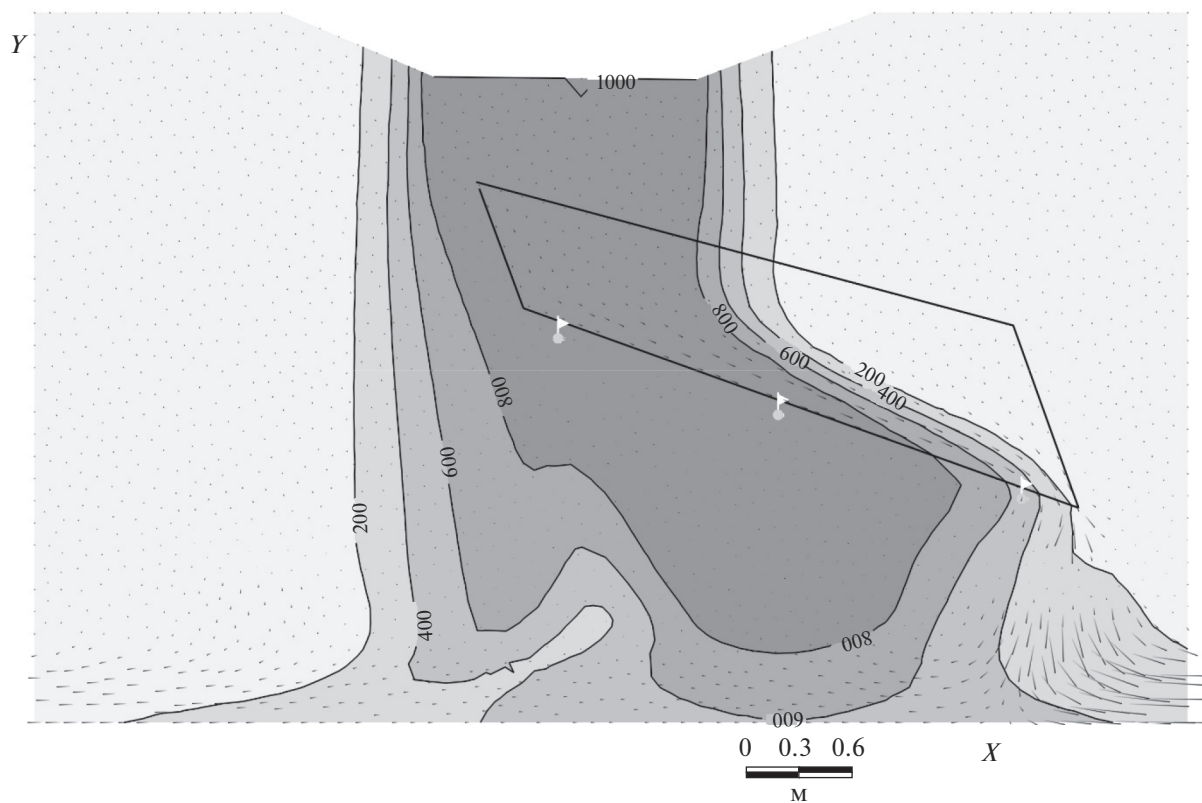
Рис. 9. Расчетное распределение концентраций консервативного трассера на 1100-е сут.

Таблица 2. Анализ чувствительности параметров двумерной задачи фильтрации и массопереноса

Параметр	Пески (все сценарии)	Пылеватый грунт (базовый сценарий 1)	Пылеватый грунт (сценарий 2 с измененным коэффициентом фильтрации)	Пылеватый грунт (сценарий 3 с измененным параметром $\alpha$ )	Пылеватый грунт (сценарий 4 с измененным параметром $n$ )	Пылеватый грунт (сценарий 5 с измененным углом наклона)
Коэффициент фильтрации, м/сут	12.4	0.7	12.4	0.7	0.7	0.7
Параметр аппроксимации Ван Генухтена, $\alpha$ , 1/м	2.3	0.25	0.25	1.0	0.25	0.25
Параметр аппроксимации Ван Генухтена, $n$ , 1/м	5.8	7.0	7.0	7.0	5.8	7.0
Угол наклона, градусы	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	0

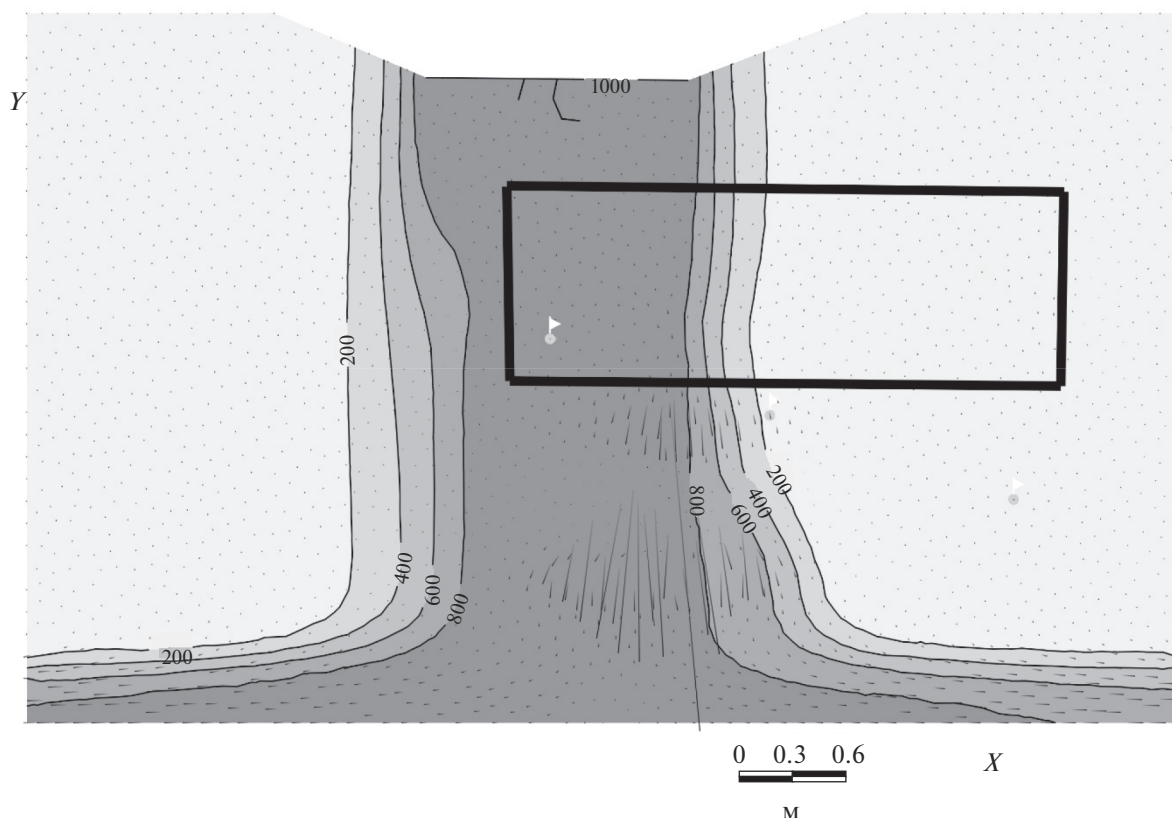


**Рис. 10.** Расчетное распределение концентраций консервативного трассера на 110-е сут для сценария с коэффициентом фильтрации пылеватого грунта, равным коэффициенту фильтрации песков (сценарий 2).



**Рис. 11.** Расчетное распределение концентраций консервативного трассера на 110-е сут для сценария с параметром Ван Генухтена  $\alpha = 1.0$  1/м для пылеватого грунта (сценарий 3).





**Рис. 12.** Расчетное распределение концентраций консервативного трассера на 110-е сут для сценария с горизонтально расположенной слабопроницаемой линзой (нулевой угол наклона слабопроницаемых отложений). Контуры линзы показаны черной жирной линией (сценарий 5).

Необходимо отметить, что существенной разницы формы ореолов для расчетов сценариев 1, 2 и 4 не отмечается и определяющий фактор – параметр аппроксимации Ван Генухтена  $\alpha$ , выражающий капиллярные эффекты и угол наклона слабопроницаемой линзы. В общем, расчеты 1 и 2 показывают существенно близкие результаты. Единственное различие между расчетами по сценариям 1 и 2 можно отметить по пьезометру 3, за счет большего коэффициента фильтрации поступление консервативного трассера идет более интенсивно (рис. 13–15).

По сценарию 3 можно отметить разницу, состоящую в том, что распространение консервативного трассера происходит преимущественно по вертикали. Об этом говорят результаты распределения ореола консервативного трассера (рис. 11), а также выходные кривые концентрации в пьезометрах. По пьезометрам 1 и 2 отмечается более интенсивный рост концентрации по этому сценарию, чем для сценариев 1 и 2. По пьезометру 3 наблюдается обратная картина. Там рост концентрации меньше, чем по пьезометрам 1 и 2.

Расчет по сценарию 4 (параметр Ван Генухтена  $n = 5.8$ ) по всем пьезометрам показал 100%-е совпадение результатов с результатом по базовому сценарию 1 и поэтому далее не приводится.

Расчет по сценарию 5 (рис. 12) с нулевым углом наклона слабопроницаемой линзы показал, что фронт движения концентрации консервативного трассера вертикальный, в отличие от расчета по базовому сценарию. Это видно по распределению концентрации и по направлениям векторов скоростей фильтрации.

### ВЫВОДЫ

Проведенные в этой работе численные эксперименты доказали формирование капиллярного барьера и показали, что его наличие зависит главным образом от угла наклона барьера, а также от параметров зоны аэрации и значений коэффициентов фильтрации. Для нулевого угла наклона барьера (слабопроницаемых отложений, характерных для пылеватого грунта) отмечается его прорыв, т.е. сквозное протекание сквозь линзу слабопроницаемых отложений.

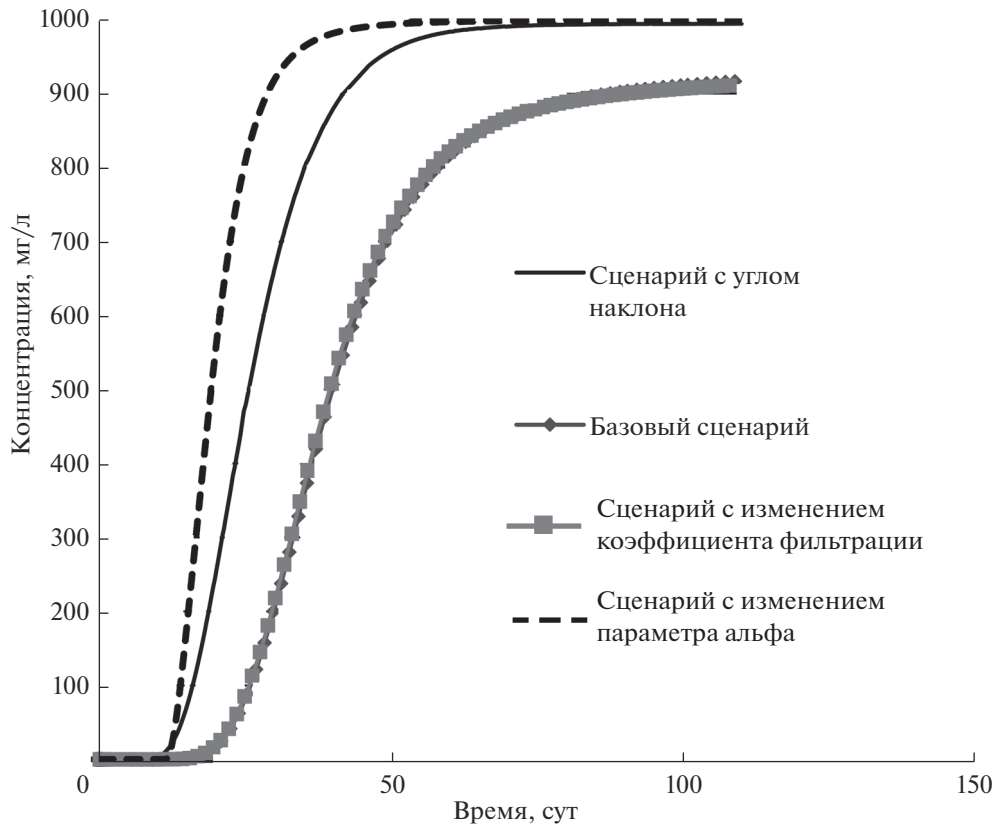


Рис. 13. Изменение концентрации консервативного трассера в пьезометре 1.

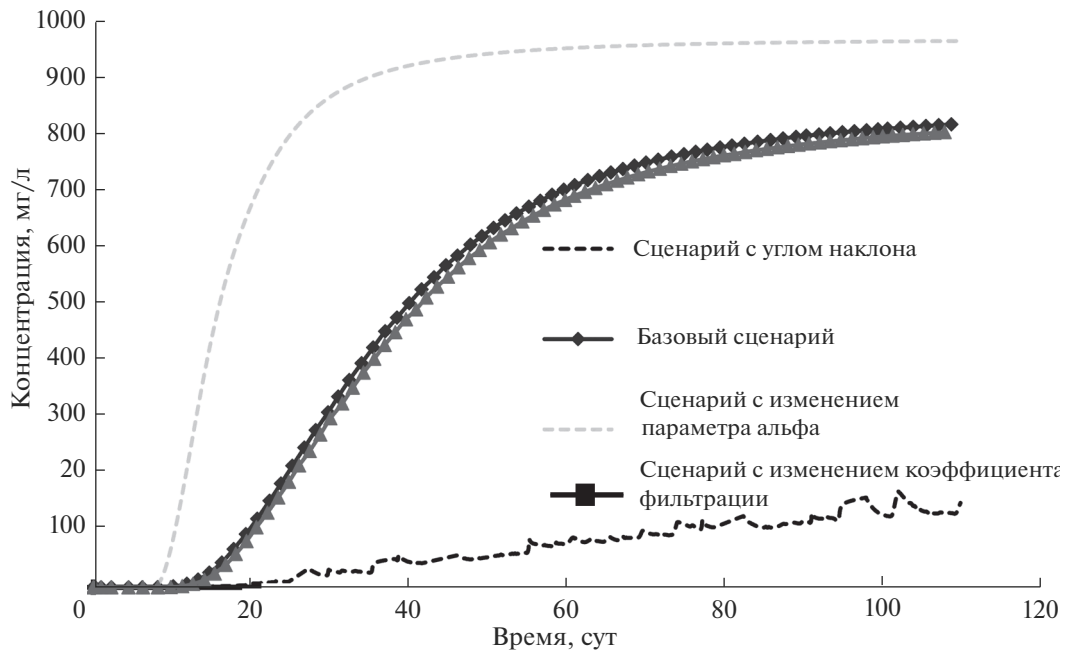


Рис. 14. Изменение концентрации в пьезометре 2.

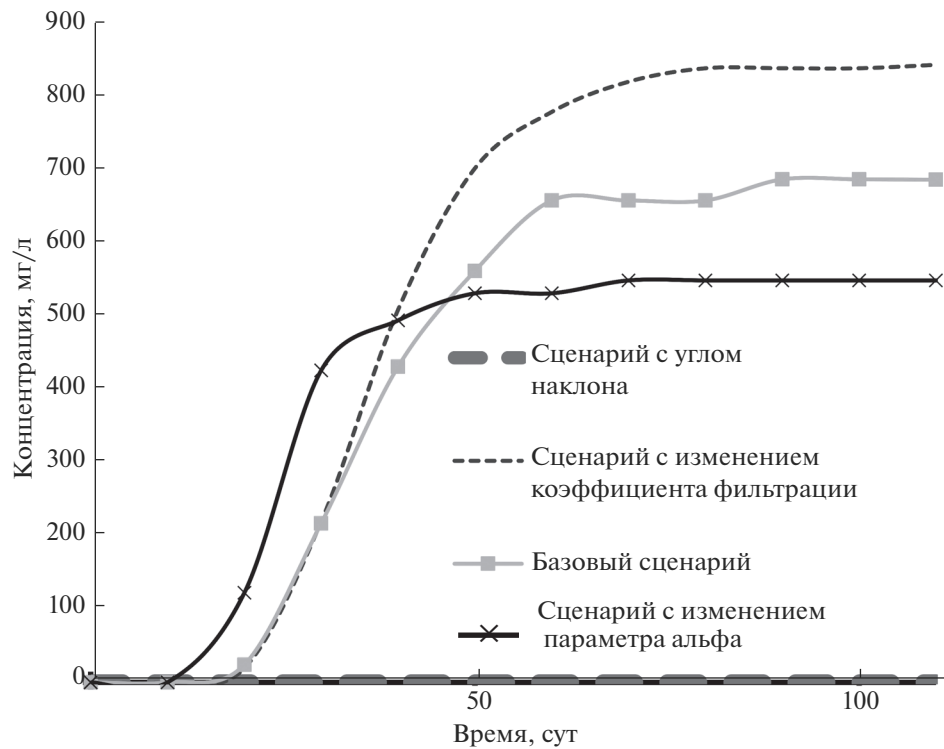


Рис. 15. Изменение концентрации в пьезометре 3.

Долговременный расчет распространения консервативного трассера показал прорыв капиллярного барьера. Под всей слабопроницаемой линзой отмечается распределение концентрации, равное источнику. Таким образом, барьер представляет собой лишь временную защиту подземных вод от поступления загрязнения с поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдберг В.М. Оценка условий защищенности подземных вод и построение карт защищенности // Гидрогеологические основы охраны подземных вод. М., 1984. С. 171—177.
2. Расторгуев А.В., Расторгуев И.А. Численное моделирование капиллярных барьеров для изоляции отходов // Вопросы радиационной безопасности. Озерск: ПО “Маяк”, 2007. № 4. С. 13—22.
3. Diersch H.J. FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Berlin. Springer Science & Business Media. 2013. 996 p.
4. Kung K. Preferential flow in a sandy vadose zone. 1. Field observation. Geoderma. 1990. 46. P. 59—71.
5. Lapalla E.G., Healy R.W., Weeks. E.P. Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media // U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Rep. 1987. no. 83-4099. 131 p.
6. Ross B. The diversion capacity of capillary barriers. Water Resour. Res. 1990. V. 26. № 10. P. 2625—2629.
7. Van Genuchten Mth. A close form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sci. Soc. 1980. V. 44. P. 892—898.