

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БАРЬЕРА «СТЕНА В ГРУНТЕ» ПРИ СОЗДАНИИ ПУНКТОВ КОНСЕРВАЦИИ И ПУНКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАО

В. В. Сускин, И. В. Капырин, Ф. В. Григорьев

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 21 января 2021 г.

*Работа посвящена оценке влияния барьера «стена в грунте» на долговременную безопасность при консервации или захоронении на месте объектов ядерного наследия, в частности промышленных водоемов, а также при создании пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО). Оценка производится путем численного моделирования в расчетном коде GeRa процессов фильтрации и массопереноса на модели референтного объекта приповерхностного захоронения. Исследуется влияние наличия покрывающего экрана на динамику распространения загрязнения. Анализируется чувствительность результатов к параметру дисперсивности, традиционно характеризующемуся высокой степенью неопределенности.*

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы, инженерные барьеры безопасности, стена в грунте, дисперсивность, код GeRa, перенос загрязнения, геофильтрация, геомиграция, пульпохранилище.

### Введение

Безопасность промышленных водоемов, пульпохранилищ и ППЗРО в части потенциально-го загрязнения подземных вод обеспечивается инженерными барьерами безопасности (ИББ). Основным назначением этих ИББ является изоляция радиоактивных отходов от окружающей среды или замедление их выхода из объекта на максимально длительный срок. По принципу действия такие барьеры можно разделить на противофильтрационные (ограничивающие поток) и противомиграционные (задерживающие загрязнители, переносимые потоком). Зачастую ИББ выполняют одновременно обе этих функции. К примеру, широко используемые глиняные экраны, в том числе бентонитовые,

обладают одновременно низкими фильтрационными свойствами и высокой сорбционной способностью.

Эффективность ИББ, созданных на этапе строительства объектов, со временем снижается вследствие их деградации (коррозии металлоконструкций, растрескивания бетона, разрыва мембран, деформаций и т. д.). В случае происходящего или ожидаемого со временем выхода загрязнения за пределы ИББ объекта могут быть созданы дополнительные сооружения, позволяющие локализовать загрязняющие вещества. Так, эффективным решением является создание проницаемых реакционных барьеров [1–3], слабо влияющих на структуру потока,

но позволяющих химическим или микробиологическим путем зафиксировать загрязнение в области создания таких барьеров. Суть этой технологии состоит в помещении на пути потока загрязненных вод материала, содержащего реакционную или сорбирующую среду. Другим решением, призванным локализовать загрязнение, является создание слабопроницаемого барьера («стена в грунте», далее — СВГ), замедляющего и перенаправляющего фильтрационный поток. Подобный опыт существует на АО «СХК» [4]: в 2011 году там проводились работы по нагнетанию через инъекционные скважины коагулирующего раствора, который содержал жидкое стекло, щавелевую кислоту, соединение алюминия и модифицирующую добавку. Созданный барьер имел протяженность 300 метров и глубину от 5 до 12 м (до первого водоупора). По результатам расчетов и мониторинга был сделан вывод, что использование созданной СВГ позволило снизить коэффициент фильтрации песков на 3–4 порядка, увеличить сорбцию и в значительной степени предотвратило распространение радионуклидов и нитрат-иона — основного токсичного макрокомпонента, изолированного в хранилище [4].

Целью настоящей работы является оценка эффективности использования подобной конструкции (СВГ) в качестве противofильтрационного барьера безопасности для объектов приповерхностного захоронения. Для этого строятся численные модели референтного объекта с различными вариантами конструкции ИББ, проводится сравнение динамики миграции загрязнителей в подземных водах с учетом СВГ и без учета таковой, оценивается влияние покрывающего экрана.

Также в ходе исследования отмечается высокая неопределенность в результатах моделирования, связанная с параметром дисперсивности, которая практически никогда не измеряется, и при моделировании обычно опираются на литературные данные, например [5–7]. Диапазон возможных значений дисперсивности варьирует в широких пределах, поэтому в работе анализируется чувствительность результата моделирования к данному параметру.

Статья построена следующим образом: сначала описана постановка модельной задачи, имитирующей реальные условия; затем представлены результаты расчетов на различных моделях: сравнивается динамика выхода радионуклидов из объекта в базовой модели (без барьера СВГ) и в моделях, учитывающих наличие барьеров безопасности (барьера СВГ и покрывающего экрана). Следующий раздел посвящен анализу

чувствительности модели к параметру дисперсивности и соответствующей неопределенности в результатах расчетов. В заключение формулируются выводы по исследованию.

## Реализация модели

Для исследования миграции загрязнителя через барьер СВГ была построена трехмерная тестовая модель в прямоугольной области (рис. 1) с помощью расчетного кода GeRa [8, 9]. Модель призвана имитировать течение подземных вод в бассейне некоторой реки от линии водораздела к руслу. Она содержит семь плоскопараллельных геологических слоев, обладающих различными коэффициентами фильтрации, с перепадом высот от правого края к левому в 20 м. Мощности слоев сверху вниз составляют 6, 3, 2, 5, 19, 22 и 30 м соответственно. В модели задан условный источник загрязнения — референтное засыпанное пульпохранилище (далее — ПХ) квадратного сечения в плане со стороной 200 м. ПХ оборудовано опоясывающим его противofильтрационным барьером типа СВГ (рис. 1). В процессе исследования рассматриваются два варианта глубины заложения барьера СВГ: до первого слабопроницаемого слоя (слой № 2) и до наиболее низкопроницаемого слоя (слой № 6), а также вариант без барьера СВГ. Предполагается, что данный барьер позволит локализовать опасные компоненты в области размещения ПХ, воспрепятствовав быстрому их продвижению с потоком подземных вод.

Граничные условия в данной модели обеспечивают направление движения подземных вод справа налево: на восточной, южной и северной границах заданы условия непротекания; на западной — условие первого рода с уровнем подземных вод 37 м (на 30 м ниже абсолютной отметки рельефа в левой части области); на верхней границе задано инфильтрационное питание, равное 0,00055 м/сут, нижняя граница модели — непроницаемая. Задача фильтрации решается в напорно-безнапорной постановке в стационарных условиях.

Для понимания структуры фильтрационного потока на рис. 2 представлены распределение напора и положение уровня подземных вод в расчетной области (вертикальный профиль) для модели без барьера СВГ. Влияние последнего на структуру потока носит локальный характер. Отметим, что граничные условия в задаче были подобраны так, чтобы уровень подземных вод находился на глубине 2,5 м в области расположения ПХ, имитируя подтопление ПХ подземными водами.

## Модели для анализа безопасности пунктов захоронения РАО

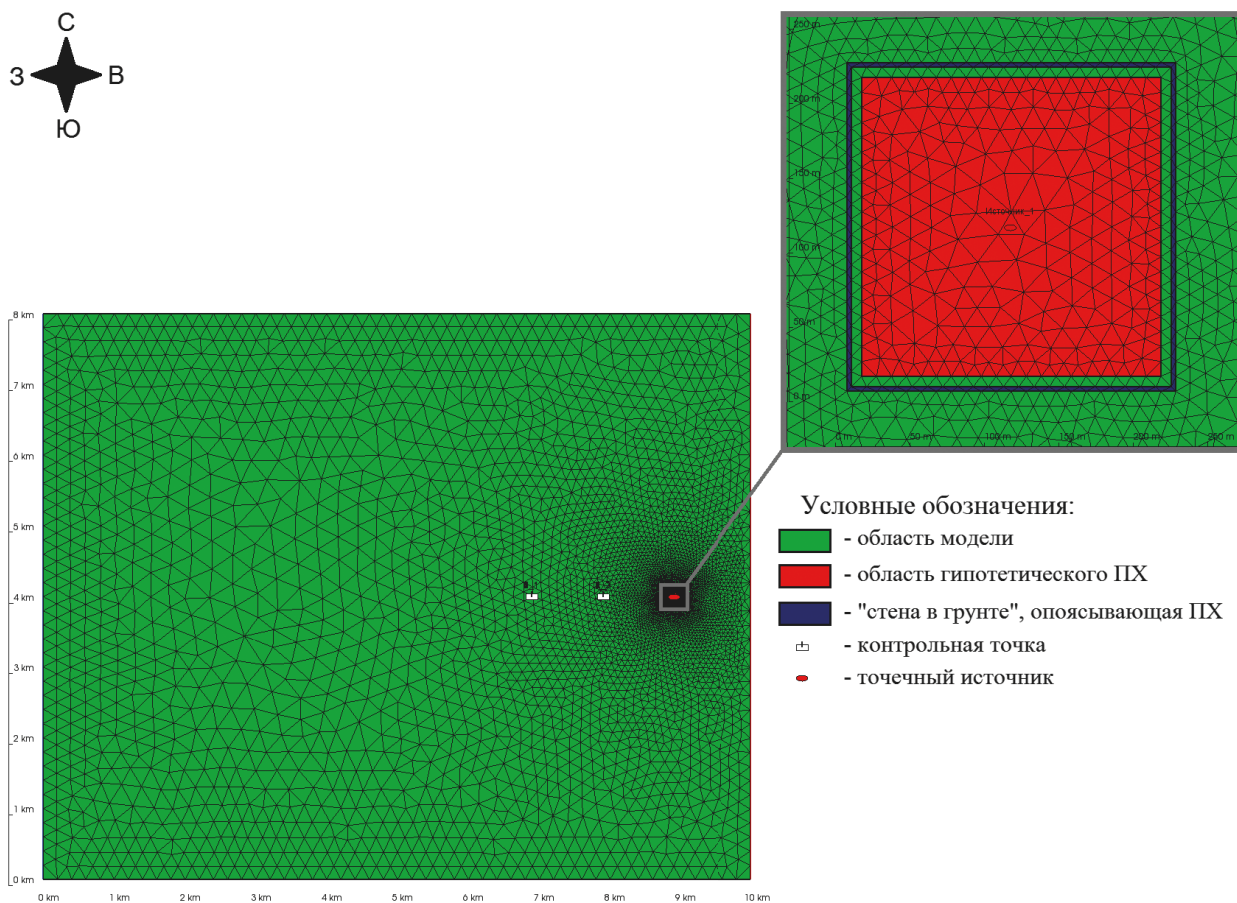


Рис. 1. Расчетная область модели в плане с расчетной сеткой

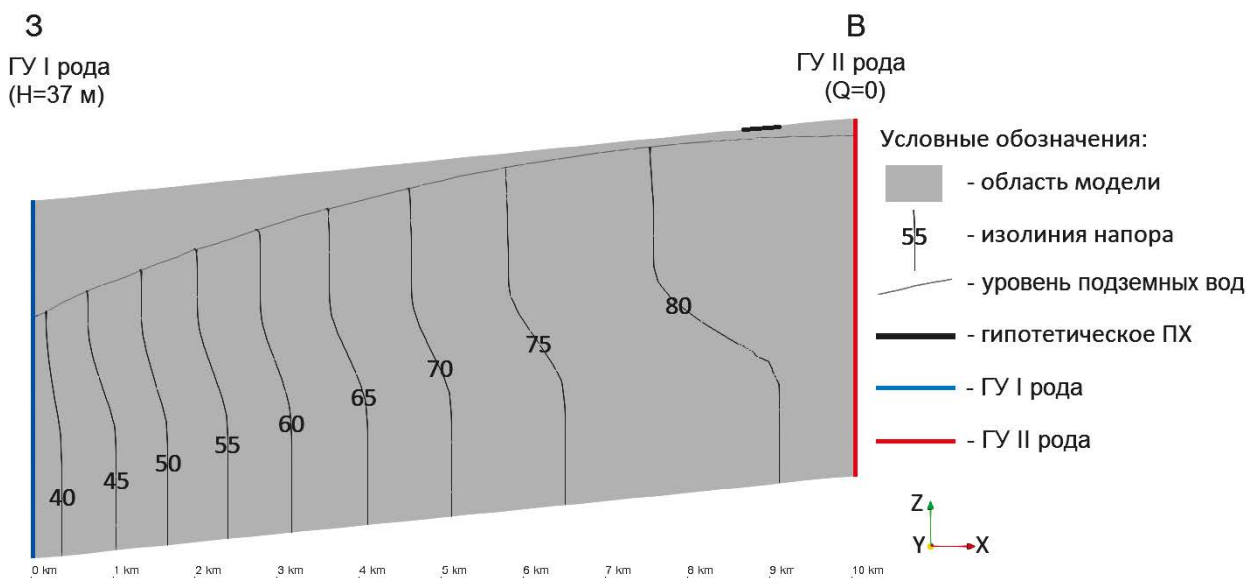


Рис. 2. Расчетное положение уровня подземных вод и распределение напоров в разрезе запад–восток (ЗВ) для модели без барьера «стена в грунте»

Коэффициенты фильтрации грунтов в слоях, используемые в модели, приведены в табл. 1. Активная пористость для всех слоев была принята равной 0,25. Водоносными горизонтами приняты нечетные слои модели № 1, 3, 5, и 7. Четные слои модели обладают существенно

меньшим коэффициентом фильтрации и считаются условно водоупорными.

Другие параметры модели представлены в табл. 2. Для расчета массопереноса рассматривается несорбируемый загрязнитель (консервативный трассер). В реальных условиях таковым

обычно считается нитрат-ион, часто присутствующий в составе отходов. Точечный источник, расположенный в верхнем слое модели в центре гипотетического ПХ (см. рис. 1), имитировал поступление загрязнения. Интенсивность источника в течение первых ста лет моделирования задана постоянной (единичной, то есть условно — 1 кг/сут), далее его интенсивность нулевая. Ширина барьера «стена в грунте» в модели принята равной 3 м.

Таблица 1. Параметры слоев модели

№ слоя	Коэффициент фильтрации, м/сут	Мощность слоя, м
1	2	6
2	0,05	3
3	2	2
4	0,05	5
5	2	19
6	0,005	22
7	20	30

Таблица 2. Параметры модели

Параметр	Значение
Пористость	0,25
Эффективный коэффициент диффузии, м <sup>2</sup> /сут	10 <sup>-5</sup>
Продольная дисперсивность, м	1
Поперечная дисперсивность, м	0,1
Инфильтрационное питание за пределами СВГ, м/сут	5,5·10 <sup>-4</sup>
Коэффициент фильтрации СВГ, м/сут	10 <sup>-5</sup>

Используемая расчетная сетка содержит 361 240 треугольно-призматических ячеек и имеет сгущение к пульпохранилищу и барьеру СВГ (см. рис. 1). Каждый модельный геологический слой разбит на 5 сеточных подслоев.

### Результаты моделирования

Для определения эффективности стены в грунте проанализированы различные типы конструкции ИББ объекта. В первую очередь рассматриваются три варианта устройства барьера СВГ:

- 1) модель без учета барьера СВГ (как референтная модель);
- 2) модель с неглубоким заложением барьера СВГ (в данном варианте барьер будет располагаться только в верхнем слое, слое № 1);
- 3) модель с глубоким заложением барьера СВГ (барьер СВГ будет располагаться в слоях с № 1 по № 5 до условного водоупора, слоя № 6).

Поскольку над реальными пульпохранилищами обычно создается покрывающий экран, препятствующий проникновению осадков, далее варианты моделей 1—3 рассматриваются с покрывающим экраном и без него, чтобы оценить комплексный эффект от двух типов ИББ. В качестве критерия эффективности работы барьеров выбрана динамика выхода консервативного трассера за пределы области, ограниченной в плане внешней границей барьера СВГ (далее — контрольной области).

### Моделирование без учета покрывающего экрана над ПХ

В данном варианте рассматривались три вышеупомянутые модели (модель с учетом глубокого заложения барьера СВГ, модель с учетом неглубокого заложения барьера СВГ и модель без барьера СВГ) с одинаковым инфильтрационным питанием, заданным над всей площадью модели, включая площадь гипотетического ПХ: 0,00055 м/сут.

Ниже приведен график зависимости интегрального (по времени) выхода загрязнителя из контрольной области от времени для трех моделей (рис. 3). В случае моделей без барьера СВГ и с его неглубоким заложением кривые (красного и зеленого цвета) практически повторяют друг друга. Кривая синего цвета, соответствующая модели с глубоким заложением такого барьера, показывает незначительную задержку во времени. Таким образом, для варианта с одинаковым инфильтрационным питанием сооружение барьера СВГ мало влияет на выход загрязнителя. Это объясняется тем, что, хотя скорость фильтрации в вертикальном направлении в верхнем слое на порядок ниже, чем в горизонтальном, вследствие малой

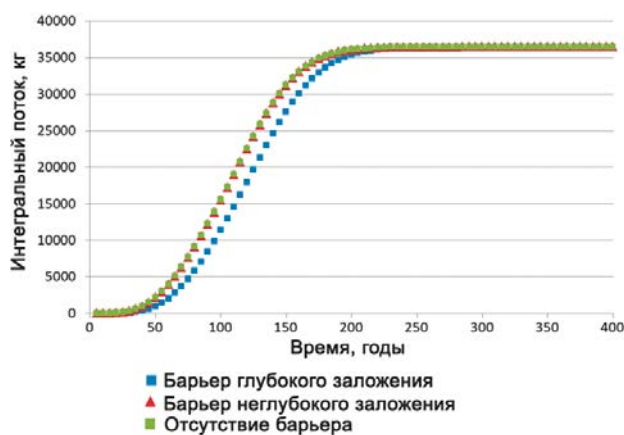


Рис. 3. Зависимость интегрального выхода загрязнителя из контрольной области от времени для трех моделей (инфильтрация во всей области одина)

мощности слоев в сравнении с их простира-нием, загрязнение сравнительно быстро мигрирует из ПХ в вертикальном направлении вниз и далее сносится потоком подземных вод в высокопроницаемом нижнем водоносном горизонте (слой № 7). При глубоком заложении барьера СВГ происходит небольшое замедление выхода загрязнения за пределы контрольной области, поскольку «канализуется» его движение: подземные воды текут только вертикально вплоть до слоя № 6 модели.

*Моделирование с учетом покрывающего экрана над ПХ*

В данном варианте инфильтрационное питание над всей площадью модели составляло 0,00055 м/сут, а над площадью ПХ —  $10^{-5}$  м/сут (так как инфильтрация не превысит коэффициента фильтрации покрывающих барьеров, ее значение соответствовало именно коэффициенту фильтрации предполагаемого покрывающего глиняного экрана, согласно требованию к глиняному экрану ППЗРО [10]).

На рис. 4 приведен график зависимости интегрального выхода загрязнителя из контрольной области от времени для трех моделей. Результаты для вариантов без барьера СВГ и при его неглубоком заложении очень близки: создание такого барьера не оказало значимого эффекта на задержку нейтрального трассера. Это связано с тем, что между областью внутри барьера СВГ и следующим ниже слоем (слоем № 2)

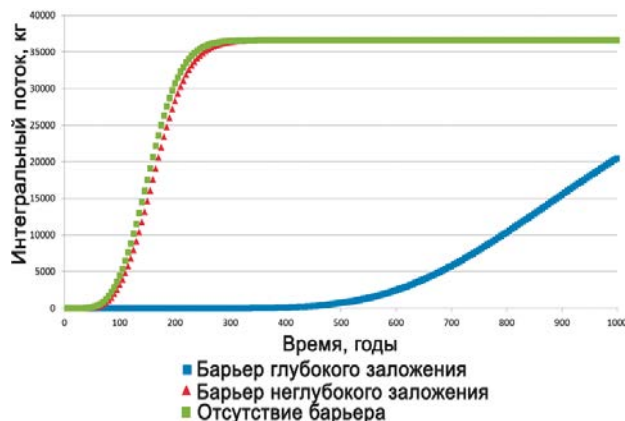


Рис. 4. Зависимость интегрального выхода загрязнителя за пределы контрольной области от времени для трех моделей с учетом покрывающего экрана над ПХ (инфильтрация над областью ПХ уменьшена до  $10^{-5}$  м/сут)

осуществляется активный водообмен за счет подныривания потока под барьер (рис. 5). Судя по приведенным графикам, загрязнение полностью выходит из контрольной области в течение приблизительно 300 лет. Напротив, при глубоком заложении барьера СВГ (до условного водоупора) интегральный поток загрязнителя не выходит на плато за время моделирования в 1000 лет, к этому моменту времени только около половины общей массы загрязнения выходит за пределы контрольной области. Это говорит о существенном влиянии этой конструкции на скорость миграции загрязнения.

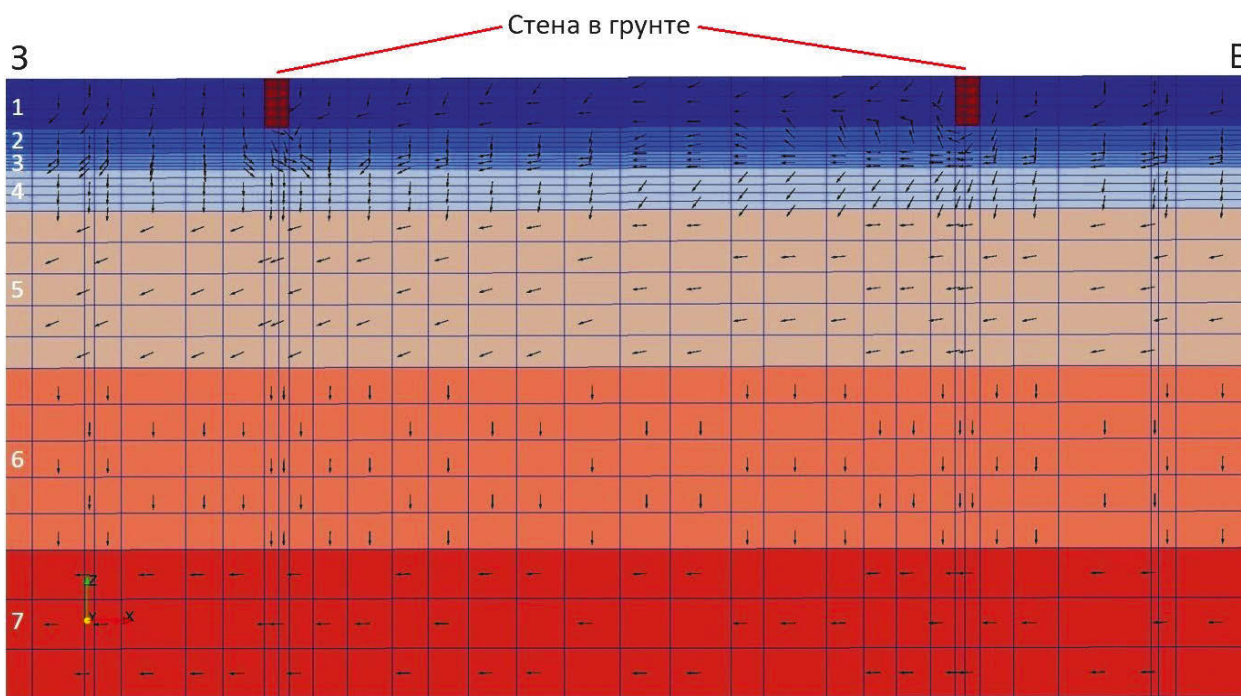


Рис. 5. Движение подземных вод в разрезе запад–восток (ЗВ) (цифрами показаны номера слоев модели) в модели с неглубоким заложением барьера СВГ

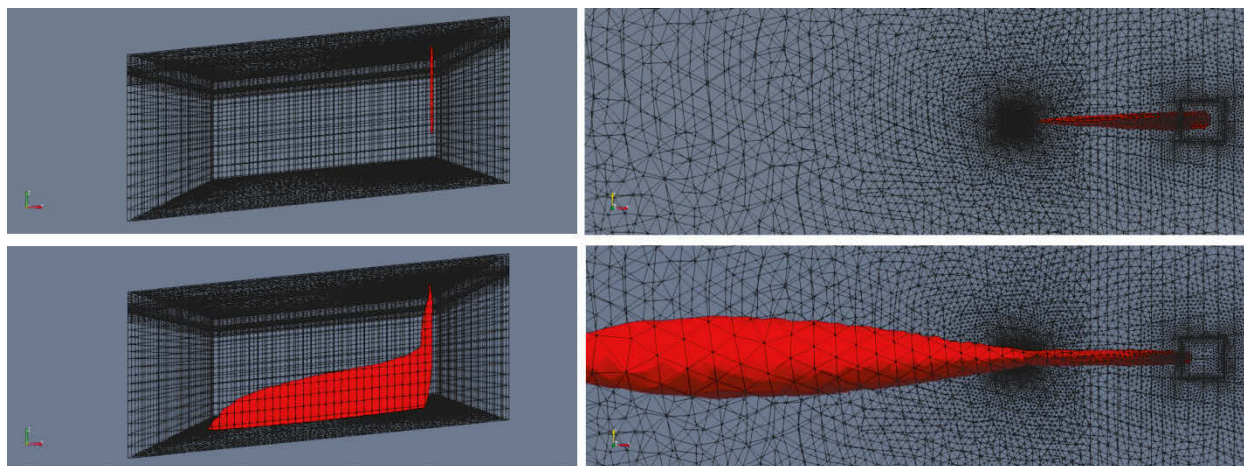


Рис. 6. Ореолы, соответствующие 0,0001 г/л нейтрального трассера, для модели с глубоким заложением барьера СВГ (сверху) и для модели без барьера (снизу) через 250 лет от начала моделирования (150 лет после прекращения поступления загрязнителя). Слева – вид в профиль, справа – вид сверху

На рис. 6 приведены ореолы распространения загрязнителя, соответствующие концентрации 0,0001 г/л нейтрального трассера, для модели с глубоким заложением барьера СВГ и для модели без него через 150 лет после прекращения поступления загрязнения. В первом случае загрязнение на этот момент времени еще не выходит за пределы барьера СВГ в слой № 1–5 и не успевает достичь нижнего водоносного горизонта (слоя № 7), а во втором — ореол загрязнения распространился в нижнем водоносном горизонте на 7,5 км.

#### Чувствительность моделей к параметрам дисперсивности

В ходе исследований было обнаружено существенное влияние дисперсивности на результаты расчетов. Ввиду отсутствия измерений данного параметра, на большинстве реальных объектов при моделировании обычно используются его оценки, сделанные на основе литературных данных. Так, по материалам работы [5], следующая формула наилучшим образом отражает связь между продольной дисперсивностью и длиной пути потока (flow length):

$$\alpha_L = 0,83(\lg L)^{2,414},$$

где  $L$  — длина пути миграции. Обычно в гидрогеологических моделях эта величина принимается как расстояние до места разгрузки подземных вод. Для рассматриваемой модели эта величина соответствовала ее левой границе, то есть длина пути миграции от ПХ составила порядка 9 км. Соответственно, величина продольной дисперсивности составляет 23 м. Величину поперечной дисперсивности обычно принимают равной 0,1 от продольной [5], то есть поперечная дисперсивность составляет 2,3 м. С другой

стороны, согласно источникам [6, 7], в которых приведены данные по более чем 130 лабораторным и полевым исследованиям трассерных экспериментов в пористой и трещиноватой средах, продольная дисперсивность при длине пути миграции около 9 км составляет около 30 м или около 100 м (в двух разных натуральных опытах были получены разные значения) согласно диаграмме разброса таких значений из этих работ.

Отметим, что зависимость дисперсивности от расстояния является следствием механизма макродисперсии, когда дисперсия вещества определяется флуктуациями действительной скорости фильтрации, вызванными пространственной изменчивостью полей коэффициента фильтрации и пористости за счет неоднородности среды [11, 12]. Распределения неоднородностей специфичны для каждого конкретного случая, поэтому данные полевых экспериментов демонстрируют, что на одном и том же масштабе на различных объектах дисперсивности могут варьировать на 2–3 порядка относительно значений, определяемых степенными законами [11].

Таким образом, при расчете параметры дисперсивности в первом приближении выбираются исходя из длины пути миграции, а затем калибруются, если это возможно. При этом распространенной практикой является задание единых дисперсивностей для всей области моделирования (см., например, [13]).

Учитывая столь высокую неопределенность данного параметра, представляется необходимым проанализировать модели с различными значениями продольной и поперечной дисперсивностей для оценки их влияния на результаты расчетов. Рассматриваются три комбинации значений продольной и поперечной дисперсивностей (в каждом слое модели задается

одна и та же комбинация дисперсивностей):

- 1) поперечная – 0,1 м, продольная – 1 м (далее – комбинация 0,1\_1),
- 2) поперечная – 2 м, продольная – 10 м (далее – комбинация 2\_10),
- 3) поперечная – 0,1 м, продольная – 10 м (далее – комбинация 0,1\_10).

Для моделей с глубоким заложением барьера СВГ и без него при наличии покрывающего экрана в области ПХ было оценено влияние дисперсивности на результат моделирования. На рис. 7 и 8 представлены графики зависимости интенсивности выхода загрязнителя за пределы контрольной области от времени для этих моделей для разных комбинаций дисперсивностей. Ожидается, что с увеличением продольной и поперечной дисперсивностей время пика выхода загрязнения наступает раньше. Для случая глубокого заложения барьера определение корректной дисперсивности в модели оказывается решающим, поскольку в комбинациях 0,1\_1 и

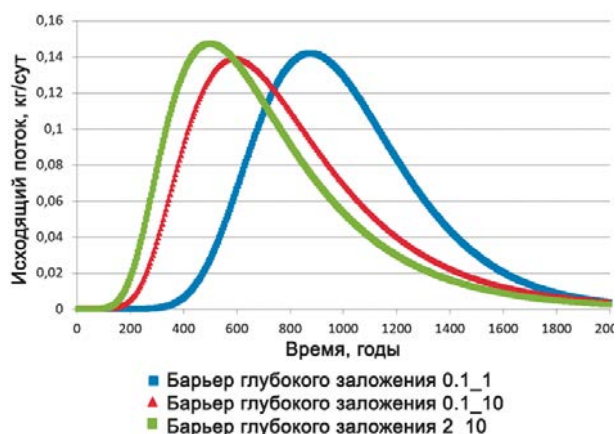


Рис. 7. Зависимость исходящего потока загрязнителя за пределы контрольной области от времени для модели с глубоким заложением барьера СВГ для разных комбинаций дисперсивностей

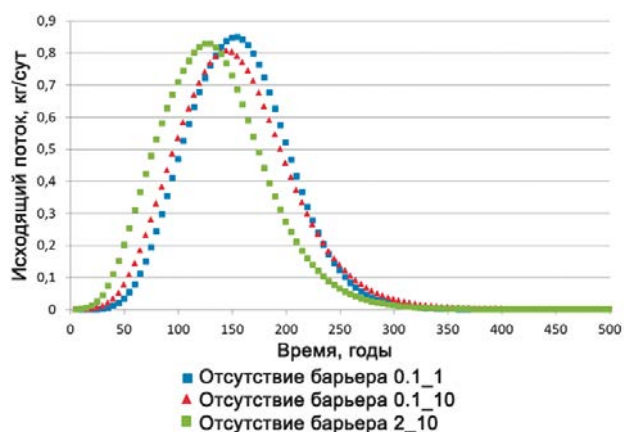


Рис. 8. Зависимость исходящего потока загрязнителя за пределы контрольной области от времени для модели без барьера СВГ для разных комбинаций дисперсивностей

2\_10 время пика разнится примерно на 300–400 лет, что составляет приблизительно один период ведомственного контроля во многих странах [14]. Столь значительная чувствительность модели с глубоким заложением барьера СВГ к изменениям дисперсивности объясняется тем, что в условиях низкого фильтрационного потока внутри барьера основную роль в выносе загрязнителя в нижние слои начинает играть диффузионно-дисперсионный механизм переноса. В свою очередь, в модели без барьера СВГ, несмотря на наличие покрывающего экрана, фильтрационный поток за счет осреднения с соседними областями остается высоким и основную роль в выносе загрязнения играет адвекция, поэтому модель слабо чувствительна к вариациям дисперсивности.

### Выводы

В работе на основе численного моделирования изучен вопрос эффективности противодиффузионного барьера типа «стена в грунте» с точки зрения долговременной безопасности объектов приповерхностного захоронения: законсервированных промводоемов или ППЗРО. В исследовании предполагалось нахождение объекта в зоне питания подземных вод, характеризующейся сравнительно низкой скоростью потока в горизонтальном направлении вблизи источника загрязнения. Такие условия характерны для ряда российских объектов. Показано, что создание противодиффузионного барьера СВГ позволяет значительно замедлить процесс переноса загрязнения в подземных водах. Установлено, что для выбранных условий сооружение барьера СВГ наиболее эффективно при наличии гидроизолирующего экрана над объектом. При этом важна и конструкция барьера. Так, при наличии покрывающего экрана барьер неглубокого заложения (на первый водоносный горизонт) оказался неэффективным ввиду «подныривания» под него потока и дальнейшего выноса загрязнения вниз; конструкция с глубоким заложением значительно задержала выход загрязнения.

В процессе исследования было также отмечено существенное влияние параметра дисперсивности на результаты моделирования в некоторых условиях. Моделирование с различными комбинациями значений дисперсивностей позволило установить низкую чувствительность результата расчета к данному параметру на модели без барьера СВГ. Напротив, модель с его глубоким заложением продемонстрировала высокую чувствительность: пик выхода загрязнения из контрольной области в случае с низкой

дисперсивностью пришлось на почти вдвое большее время от начала моделирования по сравнению с моделью с низким значением этого параметра. С учетом крайне противоречивых данных об этих параметрах в литературе и отсутствия практики их определения на объектах, параметры дисперсии являются одной из главных неопределенностей при оценке долговременной безопасности объектов и эффективности ИББ, что свидетельствует о необходимости отдельного исследования.

Полученные результаты не были априори очевидными. Эффект от создания барьера СВГ принципиально зависит от параметров окружающих вмещающих пород, наличия других барьеров безопасности, гидрогеологических условий размещения объекта. При проектировании систем ИББ для создания пунктов консервации и захоронения РАО необходимо численное моделирование, которое и позволит обосновать выбор технических решений.

Таким образом, выбор значений дисперсивностей при определенных условиях может существенно повлиять на выход загрязнения за пределы ИББ. Практика задания одинаковых дисперсивностей для всей области моделирования представляется некорректной для ситуации, когда в модели присутствуют участки, в которых характерные пространственные масштабы процессов фильтрации и переноса значительно отличаются. В рассматриваемом случае это означает, что для области внутри ИББ должны быть заданы свои, специально подобранные дисперсивности.

Возможны справедливые замечания о том, что в слабопроводящих слоях дисперсивность не должна учитывать макродисперсии, а только микродисперсию на масштабе пор. Авторами был дополнительно проведен расчет в модели с глубокой стеной с комбинацией 0,1\_1 и нулевыми дисперсивностями для слабо проницаемых слоев. Результаты оказались очень близки к расчетам в той же модели с ненулевыми дисперсивностями. Отметим также, что рассмотрение вертикально-горизонтальной анизотропии параметров дисперсии выходит за рамки данного исследования.

## Литература

1. *Obiri-Nyarko F., Grajales-Mesa S. J., Malina G.* An overview of permeable reactive barriers for in situ sustainable groundwater remediation // *Chemosphere*. 2014. Vol. 111. Pp. 243–259.
2. *Safonov A., Popova N., Andrushenko N., Boldyrev K., Yushin N., Zinicovscaia I.* Investigation of materials

for reactive permeable barrier in removing cadmium and chromium (VI) from aquifer near a solid domestic waste landfill // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. Pp. 4645–4659.

3. *Сафонов А. В., Андрущенко Н. Д., Иванов П. В., Болдырев К. А., Бабич Т. Л., Герман К. Э., Захарова Е. В.* Биогенные факторы иммобилизации радионуклидов на песчаных породах верхних водоносных горизонтов // *Радиохимия*. 2019. Т. 61. № 1. С. 63–71.

4. *Захарова Е. В., Андрущенко Н. Д. и др.* Инженерные барьеры безопасности при выводе из эксплуатации объектов ядерного топливного цикла. ARGILLA STUDIUM-2017. Материалы Пятой Российской Школы по глинистым минералам. 2017. С. 50–54.

5. *Fetter C. W.* Applied hydrogeology. 4th ed., Prentice-Hall, 2001. 615 p.

6. *Neuman S. P.* Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media // *Water resources research*. 1990. Vol. 26. № 8. Pp. 1749–1758.

7. *Charles R. Fitts* Groundwater Science. Academic Press. San Diego, California, USA, 2002.

8. *Капырин И. В., Иванов В. А., Копытов Г. В., Уткин С. С.* Интегральный код GeRa для обоснования безопасности захоронения РАО // *Горный журнал*. 2015. № 10. С. 44–50.

9. *Капырин И. В., Сускин В. В., Распоргуев А. В., Никитин К. Д.* Верификация моделей ненасыщенной фильтрации и переноса в зоне аэрации на примере расчетного кода GeRa // *Вопросы атомной науки и техники, серия Математическое моделирование физических процессов*. 2017. № 1. С. 60–75.

10. *Линге И. И., Иванов А. Ю., Казаков К. С.* О системных мерах по расширению применения глиняных материалов на объектах атомной отрасли // *Радиоактивные отходы*. 2018. № 4 (5). С. 33–41.

11. *Bear J., Cheng A. H.-D.* Modeling groundwater flow and contaminant transport. Dordrecht; London: Springer, 2010. 834 p.

12. *Румынин В. Г.* Теория и методы изучения загрязнения подземных вод: учебник для вузов. СПб.: Наука, 2020. 558 с.

13. *Куваев А. А., Семенов М. Е. и др.* Условия формирования загрязнения подземных вод хлоридами на участке хозяйственно-питьевого водозабора ОАО «ГНЦ НИИАР» // *Разведка и охрана недр*. 2013. № 10. С. 56–60.

14. Руководство по безопасности № GSG-1 «Классификация радиоактивных отходов» // Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № GSG-1, Международное агентство по атомной энергии, Вена, 2014.



### Информация об авторах

Сускин Виктор Викторович, младший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: viksus@ibrae.ac.ru.

Капырин Иван Викторович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: kapyrin@ibrae.ac.ru.

Григорьев Федор Владимирович, инженер-исследователь, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: grig-fedor@ibrae.ac.ru.

### Библиографическое описание статьи

Сускин В. В., Капырин И. В., Григорьев Ф. В. Оценка эффективности барьера «стена в грунте» при создании приповерхностных пунктов консервации и захоронения РАО // Радиоактивные отходы. 2021. № 1 (14). С. 96–105. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-96-105.

---

## ASSESSING THE EFFICIENCY OF A “BURIED WALL” BARRIER IN THE ESTABLISHMENT OF NEAR-SURFACE LONG-TERM STORAGE AND DISPOSAL FACILITIES FOR RW

Suskin V. V., Kapyrin I. V., Grigorev F. V.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on January 21, 2021

*The article evaluates the impact of a “buried wall” barrier on the long-term safety during the long-term storage<sup>1</sup> or in-situ disposal of nuclear legacy facilities, in particular, industrial reservoirs, as well as during the development of near-surface disposal facilities for radioactive waste (RWDF). For assessment purposes, filtration and mass transfer processes have been numerically modelled in the GeRa code based on a case study of a reference near-surface facility. The study explores in which way the available covering screen affects the dynamics of contaminant spread. It evaluates the sensitivity of the results to the dispersion parameter commonly characterized by a high degree of uncertainty.*

**Keywords:** radioactive waste, engineered safety barriers, buried wall, dispersibility, GeRa code, contaminant spread, geofiltration, geomigration, pulp storage facility.

### References

1. Obiri-Nyarko F., Grajales-Mesa S. J., Malina G. An overview of permeable reactive barriers for in situ sustainable groundwater remediation. *Chemosphere*, 2014, vol. 111, pp. 243–259.

2. Safonov A., Popova N., Andrushenko N., Boldyrev K., Yushin N., Zinicoscaia I. Investigation of materials for reactive permeable barrier in

removing cadmium and chromium (VI) from aquifer near a solid domestic waste landfill. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 4645–4659.

3. Safonov A. V., Andryushchenko N. D., Ivanov P. V., Boldyrev K. A., Babich T. L., German K. E., Zakharova E. V. Biogennyye faktory immobilizatsii radio-

---

<sup>1</sup>Term referred to as conservation in Russian literature

- nuklidov na peschanykh porodakh verkhnikh vodonosnykh gorizontov [Biogenic Factors of Radionuclide Immobilization on Sandy Rocks of Upper Aquifers]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2019, vol. 61, no. 1, pp. 63–71.
4. Zakharova E. V., Andryushchenko N. D. et al. Inzhenernyye bar'yery bezopasnosti pri vyvode iz eksploatatsii ob'yektov yadernogo toplivnogo tsikla [Engineered Safety Barriers During the Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities]. ARGIL-LASTUDIUM-2017. Proc. of the Fifth Russian School for Clay, 2017, pp. 50–54.
5. Fetter C. W. Applied hydrogeology. 4th ed., Prentice-Hall, 2001. 615 p.
6. Neuman S. P. Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media. *Water resources research*, 1990, vol. 26, no. 8, pp. 1749–1758.
7. Charles R. Fitts Groundwater Science. Academic Press. San Diego, California, USA, 2002.
8. Kapyrin I. V., Ivanov V. A., Kopytov G. V., Utkin S. S. Integral'nyy kod GeRa dlya obosnovaniya bezopasnosti zakhroneniya RAO [Integral Code GeRa for Radioactive Waste Disposal Safety Validation]. *Gornyi Zhurnal — Mining Journal*, 2015, no. 10, pp. 44–50.
9. Kapyrin I. V., Suskin V. V., Rastorguev A. V., Nikitin K. D. Verifikatsiya modeley nenasyshchenoy fil'tratsii i perenosa v zone aeratsii na primere raschetnogo koda GeRa. [Verification of Unsaturated Filtration and Transfer Models for the Aeration Zone Based on the Case Study of GeRa calculation code]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki, seriya Matematicheskoye modelirovaniye fizicheskikh protsessov — Issues of Atomic Science and Technology, Mathematical Modeling of Physical Processes*, 2017, no. 1, pp. 60–75.
10. Linge I. I., Ivanov A. Yu., Kazakov K. S. O sistemnykh merakh po rasshireniyu primeneniya glinyanykh materialov na ob'yektakh atomnoy otrasli [On Comprehensive Measures Allowing to Extend Clay Material Application on the Safety Barriers of Nuclear Facilities]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 4 (5), pp. 33–41.
11. Bear J., Cheng A. H.-D. *Modeling groundwater flow and contaminant transport*. Dordrecht; London: Springer, 2010. 834 p.
12. Rumynin V. G. *Teoriya i metody izucheniya zagryazneniya podzemnykh vod: uchebnyy dlya vuzov* [Theory and methods of studying groundwater pollution: a textbook for universities]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2020. 558 p.
13. Kuvaev A. A., Semenov M. E. et al. Usloviya formirovaniya zagryazneniya podzemnykh vod khloridami na uchastke khozyaistvenno-pit'evogo vodozabora OAO "GNTS NIIAR" [The Chlorite Groundwater Contamination of the Pumping Wells of JSC "State Science Center — Research Institute Of Atomic Reactors"]. *Razvedka i okhrana nedr — Prospect and protection of mineral resources*, 2013, no. 10, pp. 56–60.
14. General Safety Guide No. GSG-1 Classification of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2014

### Information about the authors

*Suskin Viktor Viktorovich*, Junior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: viksus@ibrae.ac.ru.

*Kapyrin Ivan Viktorovich*, Ph.D., Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kapyrin@ibrae.ac.ru.

*Grigorev Fedor Vladimirovich*, Research Engineer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: grig-fedor@ibrae.ac.ru.

### Bibliographic description

Suskin V. V., Kapyrin I. V., Grigorev F. V. Assessing the efficiency of a “buried wall” barrier in the establishment of near-surface long-term storage and disposal facilities for RW. *Radioactive Waste*, 2021, no. 1 (14), pp. 96–105. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-96-105. (In Russian).