

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт геологии рудных месторождений,  
петрографии, минералогии и геохимии  
Российской академии наук (ИГЕМ РАН)  
доктор геол.-мин. наук, член-корр. РАН

  
Петров Владислав Александрович

«01» июня 2021 года

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

**Куцепалова Владимира Александровича**

«Особенности загрязнения и реабилитации сильно контрастных геологических сред»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Работа Куцепалова В.А. состоит из 103 страниц текста, 19 рисунков и списка литературы из 86 наименований. Она включает введение, четыре главы и заключение.

Во введении обосновывается актуальность работы, кратко характеризуются цели и задачи исследования.

В главе 1 проводится теоретическое исследование миграции радионуклидов из подземного источника через защитный барьер с разрывными нарушениями в приближении одномерной сферически симметричной модели.

В главе 2 дается теоретический анализ извлечения радионуклидов из загрязненных пород при их промывании. Задача рассматривается в одномерном приближении модели с двойной пористостью.

В главе 3 рассматривается влияние коллоидной формы переноса радионуклидов на процессы распространения радиоактивного загрязнения в подземной среде и очистки загрязненных участков.

В главе 4 автор на основании одномерной модели течения и массопереноса загрязненных подземных вод через проницаемый сорбирующий барьер оценивает оптимальные условия использования таких барьеров для замедления распространения радиоактивного загрязнения подземной среды и очистки загрязненных пород.

В заключении диссертант приводит основные выводы из полученных им результатов.

Развитие мировой экономики связано со стабильным ростом энергопотребления. Из-за ограничений на выбросы парниковых газов этот рост не может быть обеспечен за счет ввода новых объектов, использующих сжигание ископаемого (органического) топлива. В связи с низкой пока экономической эффективностью возобновляемых источников энергии растущее энергопотребление в настоящее время можно удовлетворить только за счет развития атомной энергетики, необходимым условием которого является решение проблемы обращения с отходами атомной промышленности. Диссертационная работа связана с анализом безопасности хранилищ радиоактивных отходов и оценкой эффективности реабилитационных мероприятий на участках радиоактивных загрязнений. Поэтому она, безусловно, весьма **актуальна**.

В диссертации рассматриваются методы восстановления участков радиоактивного загрязнения, в том числе с учетом коллоидного переноса радионуклидов. В научной литературе публикуется все большее количество работ в этой области, в частности применительно к биотехнологиям, в которых основным компонентом радиоколлоида являются бактерии (см. например, Francis A.J. Impacts of microorganisms on radionuclides in contaminated environments and waste materials // In "Radionuclide Behaviour in the Natural Environment". Ed. by C. Poinssot, H. Geckeis. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. P. 161–225). Этим определяется **научная новизна** результатов диссертации и ее **соответствие мировому уровню**.

**Практическая значимость** работы заключается в возможности предварительного (оценочного) анализа при расчете прогнозов распространения радиоактивного загрязнения, выборе наиболее эффективных методов реабилитации загрязненных территорий и определении оптимальных параметров этих методов.

Результаты диссертации могут использоваться для анализа безопасности подземных хранилищ радиоактивных отходов, при разработке и оценке эффективности реабилитационных мероприятий на участках радиоактивных загрязнений .

За исключением отдельных случаев, перечисленных в приведенных ниже замечаниях, **достоверность** полученных результатов определяется корректностью используемых методов и адекватностью модельных допущений описываемым процессам.

По содержанию и оформлению диссертации следует сделать ряд замечаний.

#### **Основные замечания.**

1) В теоретических моделях диссертанта используются неизвестные параметры «проколов» в инженерных барьерах подземных хранилищ радиоактивных и токсичных отходов. Предполагается, что эти параметры могут быть оценены по данным мониторинга, а затем на

основании этих оценок и моделей диссертанта можно рассчитать долгосрочные прогнозы распространения загрязнения. Это не совсем так. Во-первых, параметры «проколов» в барьерах могут зависеть от времени вследствие процессов осаждения веществ из подземных вод и механических напряжений во вмещающих породах. Следовательно, полученные таким образом оценки будут малопригодны для расчета прогнозов. Во-вторых, модели автора основаны на статистическом усреднении процесса миграции. Поэтому для оценок параметров необходимо окружить источник множеством точек пробоотбора, в противном случае можно либо вовсе не обнаружить влияние «прокола», либо отметить случайную флуктуацию диффузии в связи с отдельным «проколом» без учета остальных «проколов» и диффузии через матрицу барьера.

2) Насколько можно судить по выражению (20) на стр. 18 диссертации, автор предполагает, что концентрация частиц загрязнения в жидкой фазе в области источника постоянна. Это не совсем так. Постоянная концентрация, соответствующая растворимости матрицы–консерванта отвержденных радиоактивных отходов, возможна при использовании кристаллических матриц типа SYNROC. Для промышленного перевода высокоактивных РАО в твердые формы применяется процесс витрификации, т.е. связывания компонентов РАО в стеклообразной (боросиликатной или алюмофосфатной) матрице. Для аморфных веществ понятие растворимости (т.е. термодинамически равновесного распределения компонентов РАО между матрицей и подземными водами) теряет смысл. Поэтому в нормативных документах по оценке безопасности хранилищ РАО используется величина интенсивности растворения. Применительно к задаче, решаемой в работе, это означает, что реальному процессу диффузии радионуклидов от источника соответствуют граничные условия второго, а не первого рода.

3) Следует отметить, что во всех определяющих уравнениях в теоретических моделях автора отсутствуют члены, учитывающие радиоактивный распад элементов – загрязнителей.

#### **Имеются также частные замечания к тексту диссертации.**

1) Оформление списка литературы не соответствуют общепринятым стандартам.

2) Стр. 15–16. Подстановка выражения (3) в (7) не очевидна, поскольку при отсутствии барьера положение внутренней границы области смещается, следовательно, функции Грина при наличии и отсутствии барьера должны отличаться друг от друга.

3) Стр. 20. До этого автор рассматривал процесс диффузии в сферических координатах, затем при записи уравнения (30) неожиданно перешел к плоской модели. По-видимому, автор предполагал, что сечение проколов остается постоянным, в связи с чем массоперенос вдоль проколов описывается плоским приближением. Но, во-первых, проколы следует ожидать более или менее равномерно распределенными в объеме барьерного слоя. Вследствие этого с

увеличением расстояния до источника суммарная площадь сечения проколов возрастает. Следовательно, использование в данном случае плоского приближения не вполне оправданно. Во-вторых, представляется не вполне оправданным учет только тех проколов, один из концов которых сообщается с внутренней или внешней границей. Влияние нарушений любого типа на величины потока в стационарном случае, описываемом двумерным уравнением эллиптического типа с ядром, имеющим разрывы вдоль конечных линеаментов, рассмотрено, например, в работе (Мальковский В.И., Мироненко В.А., Пэк А.А. Аналитическое решение задачи перетекания подземных вод через плоский пласт с поперечной трещиной // Доклады РАН. 1998. Т.361, №1).

4) Стр. 21. Диссертант пишет: «Введем случайную безразмерную величину  $u$ , через которую длина прокола выражается как  $l = au$ ». Таким образом, предполагается, что длина проколов пропорциональна радиусу барьерного слоя  $a$ . Такое предположение не очевидно.

5) Стр. 19. Ранее на стр. 16 диссертант пишет: «Перенос через барьер определяется его структурой. С одной стороны, он обусловлен диффузией по матрице барьера с очень низким коэффициентом  $d_m$  (малая величина  $d_m$  достигается, в частности, сильными сорбционными свойствами матрицы). С другой стороны, вклад в перенос дает диффузия по редким проколам, с гораздо более высоким коэффициентом диффузии  $d_p$ ,

$$d_p \gg d_m \gg$$

Насколько можно судить по рис. 1, радиус барьера равен  $a$ . Вместе с тем на стр. 21 автор пишет, что «нижний предел интегрирования  $u = 1$  в выражении (36) определяется самым коротким из возможных проколов». Если прокол проходит насквозь весь слой барьера (по предположению диссертанта  $l = au$ , следовательно, при  $u = 1$ ,  $l = a$ ), то есть длина прокола равна радиусу барьерного слоя и тогда как он может быть самым коротким?

6) Стр. 37. Диссертант пишет: «Будем далее иметь в виду, что в безбарьерной задаче асимптотики концентрации с расстоянием убывают по экспоненте

$$\tilde{c}^{\infty}(\mathbf{r}, t) \propto \exp[-\tilde{\Phi}(\mathbf{r}, t)] \quad \tilde{\Phi}(\mathbf{r}, t) \gg 1$$

В диссертации не указано, что такое  $\tilde{\Phi}(\mathbf{r}, t)$  и почему вместо скалярного символа  $r$  автор использует векторное обозначение  $\mathbf{r}$  (рассматривается трехмерный случай?). В связи с этим данные и производные от них соотношения (стр. 37–41) несут мало полезной информации.

7) Стр. 45. Поскольку на стр. 44 диссертант пишет о трехмерной области очистки (параллелепипед), переход к одномерной модели на стр. 45 непонятен.

8) Стр. 46. Постоянство граничного значения концентрации в условиях (138) диссертант мотивирует тем, что «мы рассматриваем задачу на временах, когда размер облака примеси

существенно превышает размер одного блока». Однако ранее на стр. 45 диссертант пишет, что задача рассматривается при больших числах Пекле:  $D/d \gg 1$ . В этом случае отношение изменений концентрации на границе блока к изменениям концентрации внутри блока за счет диффузии имеет порядок  $(b/L) \cdot (D/d)$ , т.е. очень малая величина умножается на очень большую. Поэтому нельзя утверждать, что их произведение будет малой величиной.

9) Точное аналитическое решение задачи (136) – (138) давно известно (Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука. 1964. гл. IX, §3). В связи с этим необходимость теоретического анализа, проводимого диссертантом в главе 2, нуждается в комментариях.

10) Стр. 58. Автор пишет: «Если в среде имеются коллоидные частицы, то, как правило, их размеры меньше апертуры каналов, по которым фильтруется вода, так что они могут переноситься течением по каналам». Это утверждение будет справедливо, если все флюидо-проводящие трещины последовательно связаны. В действительности же трещины часто выклиниваются и перетекание флюида из предыдущей трещины в следующую осуществляется через матрицу пород либо через трещины меньшей апертуры. В этом случае вероятна механическая задержка коллоидных частиц, которую автор не учитывает.

11) В формуле (175) источниковый член (правая часть равенства) учитывает лишь сорбцию радионуклидов на коллоидах, тогда как на реальный процесс влияют также осаждение радиоколлоида на породах, а также его мобилизация подземными водами. Важная роль этого фактора доказана, например, экспериментально в работах (Bowen B.D., Epstein N. Fine particles deposition in smooth parallel-plate channels // J. of Colloid and Interface Science. 1979. V. 72. № 1. P. 81–97; Elimelech M., Nagai M., Ko C.-H. et al. Relative insignificance of mineral grain zeta potential to colloid transport in geochemically heterogeneous porous media // Environmental Science and Technology. 2000. V. 34. № 11. P. 2143–2148).

Несмотря на эти замечания, диссертация Куцепалова В.А. заслуживает положительной оценки. В ней рассматриваются и решаются задачи, имеющие большое научное и практическое значение..

Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы. Основные научные результаты диссертации с достаточной полнотой опубликованы в научных изданиях.

Диссертация Куцепалова В.А. соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, паспорту специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и отрасли науки «физико-



математические науки». Автор работы, Куцепалов В.А., заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Отзыв заслушан и одобрен на заседании лаборатории «радиогеологии и радиогеоэкологии» ИГЕМ РАН от « 26 » мая 2021 года, протокол № 5/2021.

Доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник  
« 26 » мая 2021 года

  
Мальковский Виктор Иоаннович

Член-корреспондент РАН,  
доктор геолого-минералогических наук,  
заведующий лабораторией  
« 26 » мая 2021 года

  
Юдинцев Сергей Владимирович



	<p>Список публикаций сотрудников лаборатории «радиогеологии и радиогеоэкологии» ИГЕМ РАН по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет</p>
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Мальковский В.И., Юдинцев С.В. Модель коллоидного переноса радионуклидов подземными водами // Доклады АН. 2016. Т. 470. № 1. С. 87-90.</li> <li>2. Laverov N.P., Yudintsev S.V., Kochkin B.T., Malkovsky V.I. The Russian strategy of using crystalline rock as a repository for nuclear waste // Elements. 2016. Vol. 12. № 4. P. 253–256.</li> <li>3. Кочкин Б.Т., Мальковский В.И. Количественная оценка долгосрочной эволюции условий миграции радионуклидов из могильника на участке Енисейский (Красноярский край) // Геоэкология. 2016. №5. С. 401-411.</li> <li>4. Кочкин Б.Т., Мальковский В.И., Юдинцев С.В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). М.: ООО «Сам Полиграфист», 2017. 384 с.</li> <li>5. Мальковский В.И., Юдинцев С.В., Александрова Е.В. Выщелачивание имитаторов радиоактивных отходов из стеклообразной матрицы и изучение миграции продуктов выщелачивания в гнейсах // Радиохимия. 2018. Том 60. № 6. С.551–557.</li> <li>6. Malkovsky V.I., Yudintsev S.V., Sharaputa M.K., Chulkov N.V. Influence of buoyancy forces on movement of liquid radioactive waste from deep injection disposal site in the Tomsk region, Russian Federation: analytical estimate and numerical modeling // Environmental Earth Sciences. 2019. Vol. 78: 219.</li> <li>7. Мальковский В.И., Юдинцев С.В., Гупало В.С. Оценка безопасной изоляции твердых радиоактивных отходов в приповерхностных хранилищах // Атомная энергия. 2019. Том. 126. № 2. С. 102–107.</li> <li>8. Malkovsky V.I., Miroshnikov A.Yu., Yudintsev S.V. Remediation of old subsurface repositories of radioactive waste, Russia: efficiency analysis // Environmental Earth Sciences. 2020. Vol. 79. N 371. 11 p.</li> <li>9. Юдинцев С.В., Мальковский В.И., Александрова Е.В. Первичные коллоиды при гидротермальном изменении алюмофосфатного стекла с имитаторами радионуклидов // Радиохимия. 2020. Том 62. № 3. С. 258–270.</li> <li>10. Мальковский В.И. Перенос техногенных радионуклидов в земной коре. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2020. 190 с.</li> </ol>

Заведующий лабораторией  
«радиогеологии и радиогеоэкологии» ИГЕМ РАН  
доктор геолого-минералогических наук,  
член-корреспондент РАН  
Юдинцев Сергей Владимирович