

## К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАЩИТНЫХ БАРЬЕРОВ ППЗРО ПРИ НИЗКОМ ЗАЛЕГАНИИ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

Н. А. Анисимов, Е. В. Сизоненко

ФГБУ «Гидроспецгеология», Москва

Статья поступила в редакцию 13 мая 2024 г.

*Рассмотрена возможность оптимизации конструкции и материалов защитных экранов пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО) при условии залегания УГВ ниже его основания. Приведены результаты расчетов, из которых следует, что расположение в нижнем защитном экране дренажных окон (вместо использования конструкции со сплошным глиняным замком) дает существенное снижение выхода радионуклидов из ППЗРО в подземные воды. Также показано преимущество применения в боковом защитном экране гравийно-песчаной смеси вместо глины, благодаря чему происходит дополнительный отвод воды, поступающей с инфильтрующимися атмосферными осадками, от отсека с упаковками РАО.*

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы, инженерные барьеры ППЗРО, упаковки РАО, противомиграционный барьер, интенсивность поступления радионуклидов на УГВ.

Низкий уровень грунтовых вод (УГВ) является одним из важных факторов, определяющих выбор площадки для строительства ППЗРО [1].

При низком (глубоком залегании) УГВ геофильтрационный поток зоны полного влагонасыщения не затрагивает конструкции пункта захоронения, и основной функцией барьеров безопасности становится защита от проникновения инфильтрационных вод (просачивающихся атмосферных осадков). В сооружениях ППЗРО роль противофильтрационных и противомиграционных барьеров отводится глинистым материалам [2]. Они используются в буферной засыпке отсеков с размещенными радиоактивными отходами (РАО), в покрывающем (верхнем) и подстилающем (нижнем) экранах, в боковом экране, т. е. по периметру снаружи несущих железобетонных стен. При отсутствии разрывов

между боковым и подстилающим экранами они образуют сплошной глиняный «чехол», так называемый «глиняный замок» [3].

Основной функцией, которую выполняют глинистые материалы, входящие в состав покрывающего экрана, является создание противофильтрационного барьера, благодаря которому происходит отведение вод атмосферных осадков за внешний периметр строения ППЗРО и уменьшение их проникновения в отсек с упаковками РАО.

В подстилающем экране глина в первую очередь выполняет функцию противомиграционного барьера, снижающего поток радионуклидов из отсека с РАО во вмещающие породы. Также предполагается, что она — в составе глиняного замка — служит защитой от поступления внутрь сооружения ППЗРО воды, фильтрующейся во вмещающих породах [1].

Природные глинистые материалы характеризуются относительной стабильностью фильтрационных и миграционных свойств [4]. В отличие от них, конструкции и упаковки РАО, выполненные на основе цементных составов, подвержены деградационным процессам, приводящим к значительному снижению их изначально высоких изолирующих свойств.

В связи со сложностью предсказания изменений, связанных с деградацией бетона, в [5] принят подход, который в настоящее время используется при проведении оценок долговременной безопасности (ОДБ) ППЗРО: предполагается, что по истечении нескольких сотен лет после закрытия ППЗРО бетонные конструкции и упаковки РАО деградируют и приобретают свойства песка, являющегося материалом — заполнителем цементной смеси.

На рис. 1 приведена геометрия расчетной модели с расположением упаковок РАО и перечнем материалов. Верхний экран состоит из слоев почвы, дренажа и глины. Пространство между упаковками РАО заполнено буферным материалом — глинопорошком, приобретающим свойства глины в результате набухания и уплотнения, которое происходит после закрытия ППЗРО.



Рис. 1. Геометрия расчетной модели

Как видно из рисунка, УГВ находится ниже основания пункта захоронения. Таким образом, движение воды во всех элементах конструкции и, соответственно, миграция растворенных в воде нуклидов происходит в условиях неполного влагонасыщения.

Расчеты производятся на основе математических моделей фильтрации воды и миграции радионуклидов в конструкциях ППЗРО, представленных в статьях [6] и [7] соответственно. Там же приведены значения используемых при вычислениях параметров.

Расчетное моделирование показало, что гидродинамическое поле в конструкциях ППЗРО характеризуется значительной неоднородностью. На рис. 2 приведены траектории влагопереноса от наружной поверхности верхнего экрана до вмещающих пород.

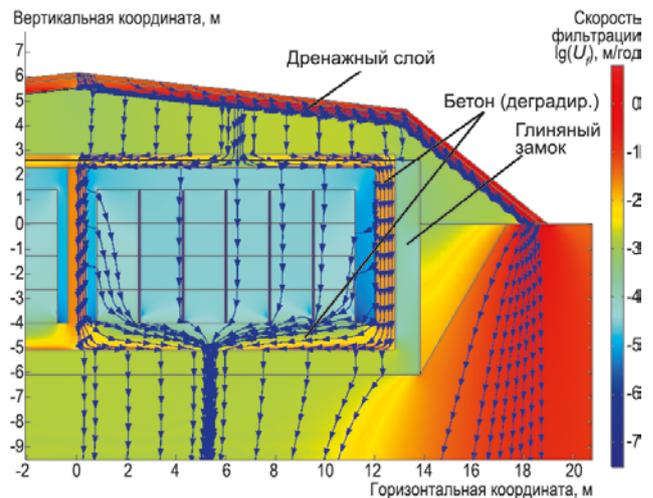


Рис. 2. Траектории влагопереноса в конструкциях ППЗРО (показана правая часть сооружения)

Значительная доля воды отводится в дренажном слое верхнего экрана на внешний периметр сооружения ППЗРО. Оставшаяся часть проникает сквозь слой глины и достигает верхнего бетонного перекрытия. Как указано выше, в модели принято, что в результате деградации материал верхнего перекрытия, как и остальных элементов бетонных конструкций, приобретает свойства песка. Под ним находится буферный наполнитель отсека с РАО, состоящий из глины. Коэффициенты фильтрации, принятые в модели, составляют: для деградировавшего бетона — 0,3 м/сут, для глины буферного наполнителя —  $4 \cdot 10^{-6}$  м/сут [6]. Из-за большой разницы в этих значениях основная доля потока, поступающего в верхнее перекрытие, направляется в сторону стен бетонных конструкций, и лишь его незначительная часть проходит сквозь отсек, содержащий упаковки РАО и буферный наполнитель, что видно по разрежению траекторий.

Согласно расчету, суммарный расход воды в стенах многократно (примерно в 5 раз) превышает данный показатель для потока через отсек с РАО. Вследствие этого в нижней части — в разрушенном бетонном основании — происходит перераспределение поступающей воды над слоем слабопроницаемой глины с образованием встречных горизонтальных потоков (рис. 2).

Радионуклиды, выходящие из отсека с РАО, поступают в верхнюю часть этих потоков и

переносятся в узкую область соприкосновения потоков и оттуда направляются в глиняный экран. В результате возникает эффект фокусирования радионуклидов в противомиграционном барьере (рис.3) [7].

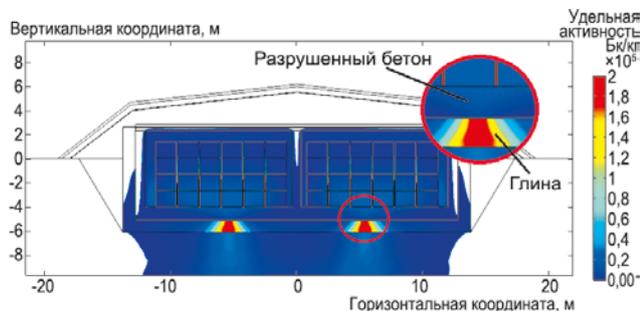


Рис. 3. Распределение удельной активности урана-238, сорбированного в элементах конструкции сооружения ППЗРО и вмещающих породах (результат расчета для 500 тыс. лет) [7]

Радионуклиды (в данном случае рассмотрен уран-238) концентрируются в ограниченной области сорбирующего материала [7]. Таким образом, эффективность противомиграционного барьера оказывается сниженной, поскольку задействована лишь небольшая часть его объема.

Сделать нижний экран эффективным противомиграционным барьером при использовании всего его объема позволяет изменение конструкции (рис. 4), при котором в нижний экран добавляются дренажные окна из материала с высоким коэффициентом фильтрации (в расчете задано значение 1,3 м/сут [6]).

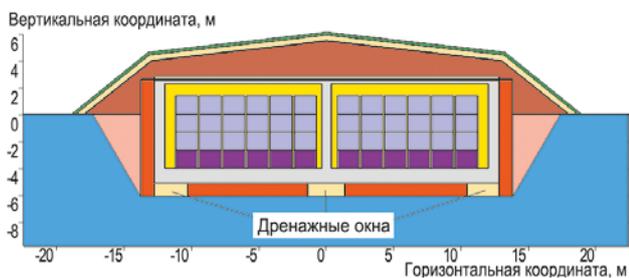


Рис. 4. Расположение дренажных окон в нижнем экране

Такое изменение оказывает существенное влияние на конфигурацию потока фильтрации в нижней части конструкции (рис. 5).

При наличии дренажных окон в них направляется вода, поступающая из деградировавшего материала боковых стен (рис. 5). При этом ее поток, выходящий из отсека с РАО и содержащий вымываемые из них радиоактивные вещества, фильтруется практически через всю ширину

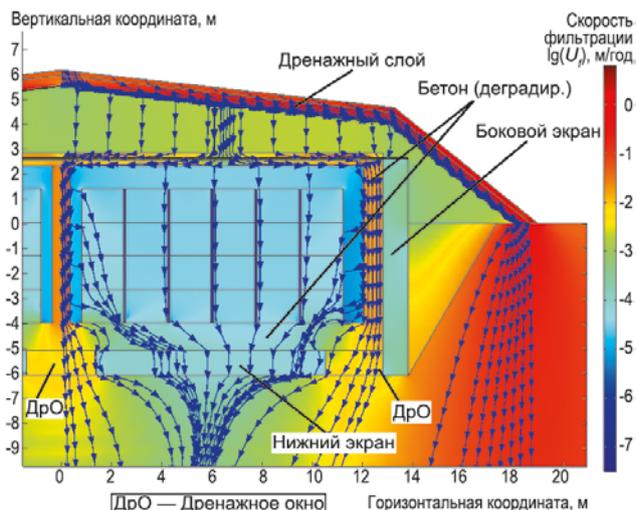


Рис. 5. Траектории влагопереноса в конструкциях ППЗРО при наличии дренажных окон в нижнем экране (приведена правая часть сооружения)

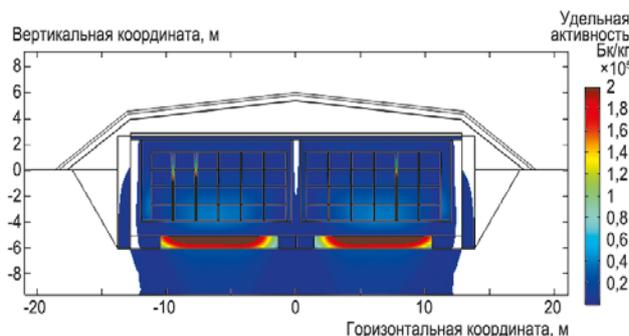


Рис. 6. Распределение удельной активности урана-238, сорбированного в элементах конструкции сооружения ППЗРО и вмещающих породах (в случае наличия дренажных окон в нижнем экране (результат расчета для 500 тыс. лет)

глиняного экрана. Вследствие этого происходит относительно равномерное распределение растворенных в воде радионуклидов по объему сорбционного барьера (рис. 6).

Поскольку миграция нуклидов через элементы конструкции ППЗРО определяется особенностями полей фильтрации (рис. 2 и 5), то приведенная на рис. 3 и 6 специфика распределения в нижнем экране урана-238 будет характерна и для остальных радионуклидов, мигрирующих из области размещения РАО.

Наряду с верхним и нижним экранами барьером безопасности также является боковой экран, служащий составной частью ограждающих конструкций ППЗРО, которые могут выполнять функцию изолирующего барьера или, напротив, иметь дренирующие свойства [8]. В приведенных выше расчетах в качестве бокового экрана была задана глина. Дополнительно к этому выполнены расчеты для материала

бокового экрана, характеризующегося высокими фильтрационными свойствами, принятыми по характеристикам песка [6].

Таким образом, выполнены расчеты для следующих четырех вариантов:

- 1) сплошной глиняный замок, охватывающий основание и периметр сооружения;
- 2) дренажные окна в нижнем (глиняном) экране, материал бокового экрана — глина;
- 3) сплошной нижний (глиняный) экран, материал бокового экрана — песок;
- 4) дренажные окна в нижнем (глиняном) экране, материал бокового экрана — песок.

На рис. 7 приведены результаты расчетного моделирования для рассмотренных вариантов в виде графиков поступления урана-238 на УГВ.

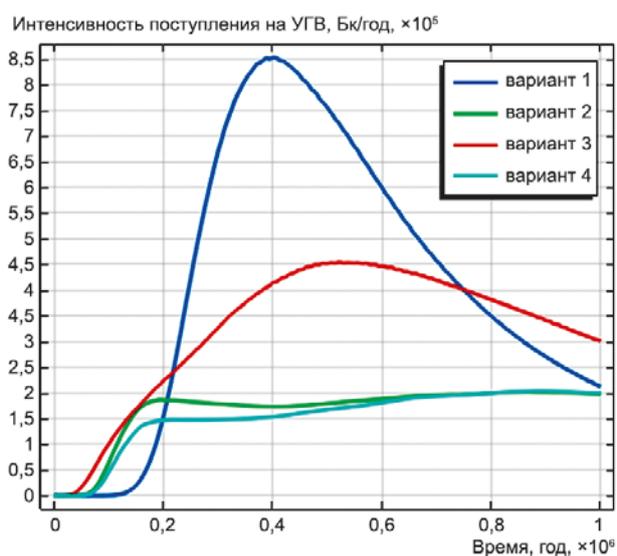


Рис. 7. Интенсивность поступления на УГВ урана-238 при вариантах 1–4, различающихся материалами и конструкцией защитных экранов

Согласно графикам рис. 7, максимальная интенсивность поступления радионуклидов на УГВ соответствует конструкции со сплошным глиняным замком (вариант 1). При наличии дренажных окон в нижнем экране (вариант 2) этот показатель после начального участка практически стабилизируется на одном уровне, максимальное значение которого примерно в 4 раза ниже, чем при варианте 1.

Замена материала бокового экрана на песок вместо глины (вариант 3) приводит к снижению (примерно в 2 раза) максимума выхода нуклида из ППЗРО. Объясняется это тем, что благодаря дренирующему эффекту происходит дополнительный отвод воды, проникающей на перекрытие отсека с РАО. В результате этого снижается поток воды, поступающей в область их

размещения, и, соответственно, уменьшается интенсивность выхода содержащихся в отходах нуклидов.

При варианте 4 совмещаются особенности вариантов 2 и 3. Однако, несмотря на некоторую разницу графиков вариантов 2 и 4 на промежутке до 0,6 млн лет, максимальное значение интенсивности поступления нуклида на УГВ при варианте 4 практически совпадает со значением при варианте 2.

Согласно расчетам, уровни поступления урана-238 на УГВ при вариантах 2 и 4 сохраняются также и за пределами интервала, показанного на рис. 7, плавно снижаясь по истечении ~2 млн лет.

Приведенные выше результаты получены для толщины нижнего глиняного экрана, равной 1 м. На рис. 8 представлена зависимость значений максимальной интенсивности поступления урана-238 на УГВ ( $W_{max}$ ), полученная в расчетах при изменении толщины экрана от 0 до 5 м для варианта с наличием дренажных окон.

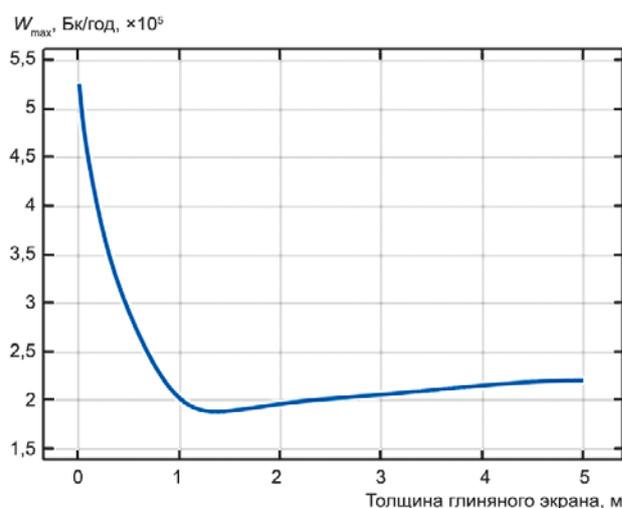


Рис. 8. Зависимость значений максимальной интенсивности поступления урана-238 на УГВ ( $W_{max}$ ) от толщины нижнего экрана

Из графика, представленного на рис. 8, следует, что снижение интенсивности поступления урана-238 на УГВ происходит с ростом толщины экрана до 1,3 м. При дальнейшем увеличении толщины имеется незначительный подъем  $W_{max}$ .

При большой толщине экрана сорбция радионуклида по его глубине характеризуется существенной неоднородностью. Это отражено на рис. 9, на котором приведено распределение удельной активности урана-238, сорбированного в элементах конструкции ППЗРО, полученное при толщине глиняного экрана 3 м.

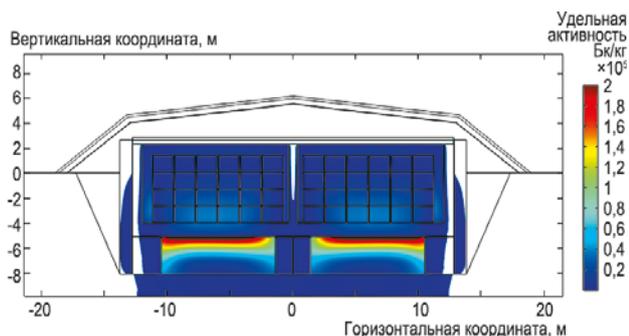


Рис. 9. Распределение удельной активности урана-238, сорбированного в элементах конструкции сооружения ППЗРО и вмещающих породах в случае наличия дренажных окон в нижнем экране при толщине глиняного экрана 3 м (результат расчета для 500 тыс. лет)

Сорбированный в глиняном экране уран-238 концентрируется в основном в верхних 1,5 метрах, чем объясняется неравномерность графика, приведенного на рис. 8.

Согласно расчетам, данный вывод справедлив и для других радионуклидов. Таким образом, рабочая толщина глиняного экрана, которая является оптимальной и достаточной для максимального снижения интенсивности выхода радионуклидов из пункта захоронения и их поступления на УГВ, при рассмотренной конструкции ППЗРО составляет около 1,5 м (рис. 8).

### Заключение

Исходя из приведенных расчетов, можно сделать вывод, что при залегании УГВ ниже основания сооружения предпочтительным вариантом устройства барьеров безопасности является не сплошной глиняный замок, охватывающий основание и периметр сооружения, а нижний глиняный экран с наличием дренажных окон. Такая конструкция позволяет равномерно распределить нуклиды по объему противомиграционного барьера, что приводит к существенному снижению интенсивности поступления нуклидов на УГВ.

Радиационные последствия, вызванные распространением радионуклидов в подземных водах, напрямую зависят от интенсивности их поступления из источников [5]. Из этого следует, что конструкция ППЗРО, при которой в нижнем глиняном экране имеются определенным образом расположенные дренажные окна, позволяет, сохраняя требуемый уровень долговременной безопасности, в несколько раз увеличить допустимую емкость пункта захоронения по суммарной активности значимых радионуклидов по сравнению с конструкцией со сплошным глиняным экраном.

При этом получено, что оптимальная толщина нижнего глиняного экрана находится в диапазоне 1—2 м.

Согласно расчетам, при залегании УГВ ниже основания сооружения ППЗРО предпочтительным для бокового экрана является материал с высокой фильтрационной проницаемостью, например песок или смесь гравия с песком. В этом случае в нем будут отводиться воды, поступающие как с внешней стороны сооружения, так и изнутри, что приводит к уменьшению фильтрационного потока в области размещения РАО. В целом из приведенных результатов следует, что оптимальность конструкции ППЗРО достигается при наличии в ней противомиграционных и противомиграционных барьеров в сочетании с дренирующими элементами.

### Благодарности

Авторы выражают признательность:

Куваеву Андрею Алексеевичу, доктору геолого-минералогических наук, начальнику отдела ГИС технологий и математического моделирования ФГБУ «Гидроспецгеология», за редактирование статьи, ценные рекомендации по перспективам развития данной работы и всестороннюю поддержку инициатив в области оценок безопасности ППЗРО;

Святовцу Сергею Владимировичу, начальнику Управления объектного мониторинга состояния недр ФГБУ «Гидроспецгеология», за проявление постоянной заинтересованности и активное содействие применению передовых средств расчетного анализа.

### Литература

1. НП-069-14. Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности.
2. Ильина О. А., Крупская В. В., Винокуров С. Е., Калмыков С. Н. Современное состояние в разработках и использовании глинистых материалов в качестве инженерных барьеров безопасности на объектах консервации и захоронения РАО в России // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 71—81. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84.
3. Игин И. М., Минин А. В., Бамборин М. Ю., Кузьмин Е. В., Трофимова Ю. В. Определение прогнозных сроков долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов при различных сценариях их эксплуатации // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 50—59. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-50-60.

4. Савоненков В. Г., Андерсон Е. Б., Шабаетов С. И. Глины как геологическая среда для изоляции радиоактивных отходов / Гос. корпорация по атомной энергии «Росатом», ФГУП НПО «Радиевый ин-т им. В. Г. Хлопина». — Санкт-Петербург, Инфо Ол, 2012. 215 с.
5. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Vol. 1 and 2. — IAEA, Vienna, 2004.
6. Анисимов Н. А., Куваев А. А. Численное моделирование влагопереноса в конструкциях приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 97—106. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-97-106.
7. Анисимов Н. А., Куваев А. А., Сизоненко Е. В. Численное моделирование миграции радионуклидов в конструкциях и ближней зоне приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 4 (25). С. 89—100. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-4-89-100.
8. Павлов Д. И., Ильина О. А. О системном подходе к выбору барьеров безопасности для захоронения РАО классов 3 и 4 // Радиоактивные отходы. 2020. № 3 (12). С. 54—65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-54-65.

---

### Информация об авторах

Анисимов Николай Александрович, главный специалист отдела ГИС технологий и математического моделирования, ФГБУ «Гидроспецгеология» (123060, Москва, ул. Маршала Рыбалко, д. 4), e-mail: anisn@bk.ru, anisn@msnr.ru.

Сизоненко Елена Владимировна, ведущий специалист отдела ГИС технологий и математического моделирования, ФГБУ «Гидроспецгеология» (123060, Москва, ул. Маршала Рыбалко, д. 4), e-mail: Butterfly16@list.ru, sizonenko@msnr.ru.

### Библиографическое описание статьи

Анисимов Н. А., Сизоненко Е. В. К вопросу об оптимизации инженерных защитных барьеров ППЗРО при низком залегании уровня грунтовых вод // Радиоактивные отходы. 2024. № 3 (28) С. 76—82. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-3-76-82.

---

## ON THE OPTIMIZATION OF ENGINEERED SAFETY BARRIERS AT A NEAR-SURFACE RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL FACILITY PROVIDED LOW-LYING GROUNDWATER LEVELS

Anisimov N. A., Sizonenko E. V.

FSBI “Gidrospezgeologiya”, Moscow, Russia

Article received on May 13, 2024

*The paper explores the potential for optimizing the designs and materials of protective screens at a near-surface radioactive waste disposal facility (NSDF) provided its base being installed above the groundwater level. It presents the calculation results evidencing that the drainage windows provided in the bottom protective screen (instead of continuous clay retainer) would reduce considerably the radionuclide releases from the NSDF into groundwater. The paper discusses the advantage associated with gravel-sand mixture used instead of clay in the lateral protective screen designs contributing to additional drainage of seepage water from the disposal compartments with radioactive waste packages.*

**Keywords:** radioactive waste, engineered barriers of NSDF, radioactive waste packages, anti-immigration barrier, intensity of radionuclide releases to the ground water level.

### Acknowledgments

The authors express their gratitude to:

Andrey Alekseevich Kuvaev, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Department of GIS Technologies and Mathematical Modeling of the Federal State Budgetary Institution Gidrospetsgeologiya for editing the article, his valuable recommendations on further advancement of this work and comprehensive support in the safety assessments of NSDF;

Sergei Vladimirovich Svyatovts, Head of the Department for Facility-level Monitoring of Subsoil Conditions of the Federal State Budgetary Institution Gidrospetsgeologiya for his constant interest and active assistance in the application of advanced computational means.

### References

1. NP-069-14. *Pri-poverkhnostnoye zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov. Trebovaniya bezopasnosti* [Near-surface disposal of radioactive waste. Safety requirements].
2. Ilina O. A., Krupskaya V. V., Vinokurov S. E., Kalmykov S. N. *Sovremennoe sostoyanie v razrabotkakh i ispol'zovanii glinistyykh materialov v kachestve inzhenernykh bar'erov bezopasnosti na ob'ektakh konservatsii i zakhoroneniya RAO v Rossii* [State-of-Art in the Development and Use of Clay Materials as Engineered Safety Barriers at Radioactive Waste Conservation and Disposal Facilities in Russia]. *Radioaktivnye othody – Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 71–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84.
3. Igin I. M., Minin A. V., Bamborin M. Yu., Kuzmin E. V., Trofimova Iu. V. *Opreделение prognoznykh srokov dolgovremennoj bezopasnosti punktov pri-poverkhnostnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov pri razlichnykh scenariyakh ikh ehk-spluatatsii* [Forecasted timeframes for the longterm safety of near-surface disposal facilities for radioactive waste calculated considering various scenarios of their operation]. *Radioaktivnye othody – Radioactive Waste*, 2022, no. 3 (20), pp. 50–60. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-50-60.
4. Savonenkov V. G., Anderson E. B., Shabayev S. I. *Gliny kak geologicheskaya sreda dlya izolyatsii radioaktivnykh otkhodov* [Clays as a geological medium for radioactive waste disposal]. Gos. korporatsiya po atomnoj ehnergii “Rosatom”, FGUP NPO “Radiyevy in-tim. V. G. Khlopina” [State Atomic Energy Corporation Rosatom (ROSATOM), V. G. Khlopin Radium Institute]. Saint Petersburg, Info OI Publ., 2012. 215 p.
5. *Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities*. Vol. 1 and 2. IAEA, Vienna, 2004.
6. Anisimov N. A., Kuvaev A. A. *Chislennoe modelirovanie vlagoperenosa v konstrukciyakh pri-poverkhnostnogo punkta zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov* [Numerical Modeling of Moisture Transfer in the Structures of a Near-Surface Radioactive Waste Disposal Facility]. *Radioaktivnye othody – Radioactive Waste*, 2022, no. 3 (20), pp. 97–106. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-97-106.
7. Anisimov N. A., Kuvaev A. A., Sizonenko E. V. *Chislennoe modelirovanie migratsii radionuklidov v konstrukciyakh i blizhney zone pri-poverkhnostnogo punkta zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov* [Numerical modeling of nuclide transport in structures and the near field of a near-surface radioactive waste disposal facility]. *Radioaktivnye othody – Radioactive Waste*, 2023, no. 4 (25), pp. 89–100. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-4-89-100.
8. Pavlov D. I., Ilina O. A. *O sistemnom podkhode k vyboru bar'erov bezopasnosti dlya zakhoroneniya RAO klassov 3 i 4* [On a System Approach to the Selection of Safety Barriers for the Disposal of Radioactive Waste Class 3 and 4]. *Radioaktivnye othody – Radioactive Waste*, 2020, no. 3 (12), pp. 54–65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-54-65.

### Information about the authors

*Anisimov Nikolay Alexandrovich*, Chief Specialist of GIS Technologies and Mathematical Modeling Department, FSBI “Gidrospeztzgeologiya” (4, Marshal Rybalko st., Moscow, 123060, Russia), e-mail: anisn@bk.ru, e-mail: anisn@msnr.ru.

*Sizonenko Elena Vladimirovna*, Leading Specialist of GIS Technologies and Mathematical Modeling Department, FSBI “Gidrospeztzgeologiya” (4, Marshal Rybalko st., Moscow, 123060, Russia), e-mail: Butterfly16@list.ru, e-mail: sizonenko@msnr.ru.

### Bibliographic description

Anisimov N. A., Sizonenko E. V. On the Optimization of Engineered Safety Barriers at a Near-Surface Radioactive Waste Disposal Facility Provided Low-Lying Groundwater Levels. *Radioactive Waste*, 2024, no. 3 (28), pp. 76–82. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-3-76-82. (In Russian).