

Мониторинг напряженно-деформированного состояния массива горных пород при подземном захоронении жидких радиоактивных отходов

С. Ю. Малышков^{1}, О. Н. Кокорев², В. Ф. Гордеев¹, В. И. Поливач¹*

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН), г. Томск, Российская Федерация

² ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», г. Северск, Российская Федерация

* e-mail: msergey@imces.ru

Аннотация. Обеспечение надежной изоляции радиоактивных отходов атомной промышленности определяется технологией их нагнетания, а также геологическими условиями среды, куда производится захоронение. В целях подтверждения локализации жидких радиоактивных отходов в установленных прогнозных границах и подтверждения технически исправного состояния подземных сооружений проводятся работы по мониторингу состояния недр и подземных сооружений. Получаемые результаты мониторинга состояния недр и подземных сооружений используются в качестве исходных данных для верификации разработанных и применяемых для обоснования долговременной безопасности моделей и при необходимости оптимизации режимов захоронения. Целью геофизических исследований, описанных в статье, являлась оценка реакции геологической среды на изменение работы нагнетательной скважины. Работы проводились методом естественного импульсного электромагнитного поля Земли, который для этих целей применялся впервые. Приведены результаты оценки изменения напряженно-деформированного состояния горных пород на изменение пластового давления. Проведенные исследования показали высокую перспективность метода для геотехнологического мониторинга пунктов глубинного захоронения отходов атомной промышленности. В работе предложены новые критерии оценки напряженно-деформированного состояния горных пород.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное поле, электромагнитная эмиссия, напряженно-деформированное состояние, мониторинг, жидкие радиоактивные отходы, скважина, геофизические исследования

Введение

Первые работы по мониторингу напряженно-деформированного состояния горных пород (НДС ГП) и прогнозу активизации экзогенных процессов методом естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) были поставлены в Томском политехническом институте (сейчас университет) [1–4], и эти работы в Томской научной школе продолжают сейчас [5–12]. Метод основан на явлении электромагнитной эмиссии – способности генерировать электромагнитные сигналы при механическом или теп-

ловом воздействии на хрупкие непроводящие материалы [13–15]. Несмотря на то, что метод ЕИЭМПЗ включен в нормативно-разрешительные документы для проведения инженерно-изыскательских работ для строительства [16] и рекомендован для оценки НДС горных пород, развитие приборно-методической базы не потеряло актуальности для повышения достоверности получаемых результатов. Не менее важна разработка новых методов контроля производственных процессов, связанных с изменением НДС ГП, и особенно в таких потенциально опасных отраслях, как атомная промышленность. В настоя-

щее время самым безопасным и экономически выгодным способом утилизации жидких радиоактивных отходов (ЖРО) считается их подземное захоронение [17]. Для оценки локализации ЖРО в прогнозных границах и мониторинга исправности подземных сооружений проводится геотехнологический мониторинг, включающий наблюдение за состоянием недр и подземных сооружений [18–22]. Оценка безопасности основана на сопоставлении текущих параметров нагнетания отходов в эксплуатационные горизонты с полученными фактическими данными о состоянии недр и подземных сооружений.

В данной статье представлены результаты дополнительных геофизических исследований, выполненных на площадке 18 глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов «Северский». Целью геофизических исследований являлась оценка реакции геологической среды на изменение работы нагнетательной скважины ЖРО. Работы проводились методом ЕИЭМПЗ, который для этих целей применялся впервые.

Методы

Метод ЕИЭМПЗ ранее применялся для поиска активных разломов и картирования участков с наиболее опасными геологическими процессами, определении степени их опасности для проектируемых или расположенных на них инженерных сооружений [23]. Применяемые методы основаны на явлении электромагнитной эмиссии – способности диэлектрических материалов, в том числе горных пород, излучать электромагнитные сигналы при воздействии на них. Мониторинг электромагнитного излучения горных пород в условиях их естественного залегания позволяет контролировать напряженно-деформированное состояние горного массива.

Результаты, представленные в этой работе, получены многоканальными регистраторами «МГР-02-16», разработанными в ИМКЭС СО РАН [24–26]. Работы проводились при пороге дискриминации по напряженности поля 0,1 А/м на резонансной частоте 17,5 кГц.

При производстве работ использовалось два регистратора. Одним из них проводились измерения интенсивности и амплитудных характеристик ЕИЭМПЗ в непосредственной близости от нагнетательной скважины (далее – полевой регистратор). Другой аналогичный регистратор был установлен за пределами зоны возможной деформации горных пород, связанной с закачкой ЖРО, и использовался в качестве вариационного. Каждым из регистраторов производилась съемка параметров ЕИЭМПЗ по двум каналам преимущественного приема в направлениях север-юг и запад-восток с интервалом дискретизации 1 секунда в разные дни сентября-ноября 2022 г. Поскольку на нагнетательной скважине установлено оборудование учета и контроля с импульсными источниками питания, для исключения влияния электромагнитных помех от них анализ проводился только по каналу запад-восток, диаграмма направленности которого не захватывала источники возможных помех.

В качестве информативного признака при расчете аномалий ЕИЭМПЗ использовался коэффициент аномальности ЕИЭМПЗ, показывающий отличие интенсивности импульсного поля, зарегистрированного полевым регистратором, от аналогичного параметра, зарегистрированного вариационным регистратором в тот же интервал времени.

Коэффициент аномальности рассчитывался по формуле:

$$K = \begin{cases} \frac{N_p}{N_v} - 1, & \text{если } N_p \geq N_v, \\ 0 - \frac{N_v}{N_p} + 1, & \text{если } N_p \leq N_v, \end{cases}$$

где K – коэффициент, отражающий свойства горных пород в месте регистрации; N_v – интенсивность ЕИЭМПЗ, зарегистрированная вариационным регистратором; N_p – интенсивность ЕИЭМПЗ, зарегистрированная полевым регистратором.

При таком способе обработки положительные и отрицательные аномалии в структуре ЕИЭМПЗ могут изменяться в одинако-

вом диапазоне с одинаковым коэффициентом пропорциональности.

Отрицательные аномалии в структуре ЕИЭМПЗ, как правило, приурочены к зонам сжатия. Положительные аномалии свидетельствуют, что горные породы находятся в зоне растяжения или в трещиноватом состоянии. Работы по регистрации интенсивности ЕИЭМПЗ вблизи нагнетательных скважин проводились впервые, и критериев оценки реакции ГП на изменение динамики работы нагнетательной скважины не существует.

Результаты

Захоронение ЖРО на площадках 18 и 18а ПГЗ ЖРО «Северский» выполняется в нижние горизонты чехла Западно-Сибирской плиты, сложенного песчано-глинистой толщей мезо-кайнозойского возраста общей мощностью до 470 м. Эксплуатационные горизонты имеют неоднородное строение [20]. Они сложены прибрежно-морскими отложениями вдоль береговых подводных аккумулятивных форм, областей воздействия волновой переработки и дельтовыми отложениями. Представлены преимущественно песками от крупно- до тонкозернистых, с незначительной примесью глинистого материала. Преобладают мелкозернистые малоглинистые пески. Присутствуют многочисленные пропластки и линзочки глинистых пород. Водупорные горизонты сложены глинистыми породами с прослоями тонкозернистых песков. Эксплуатационный горизонт, в который ведется закачка, соответствует нижнему маастрихту – нижнему кампану верхней и средней подсвиты сымской свиты [22]. Удельное сопротивление вышележащих от него пород составляет 10–200 Ом·м.

Задачей исследования ставилась проверка возможности метода ЕИЭМПЗ для оценки реакции геологической среды на изменение работы нагнетательной скважины. При выполнении исследований нагнетание ЖРО велось на глубину 300–350 м с давлением на устье скважины 871 кПа. При резонансной частоте приемных каналов регистраторов 17,5 кГц и удельном сопротивлении горных пород, указанном выше, основные источники

ЕИЭМПЗ, от которых можно ожидать сигнал на дневной поверхности, находятся выше эксплуатационного горизонта.

В первом эксперименте 29 сентября в качестве вариационного использовался регистратор, установленный на научно-исследовательском полигоне в 60 м от полевого. В период времени около 5 ч UTC режим работы нагнетательной скважины был изменен для уменьшения интенсивности закачки. Точное время изменения работы не известно, так как съем показаний с приборов учета ведется с периодичностью 6 ч. Значения коэффициента, отражающего деформационные свойства горных пород, приведены на рис. 1, а. Видно, что при изменении интенсивности закачки коэффициент смещается в зону отрицательных значений. Такие аномалии классифицируются как напряжения сжатия ГП. Кроме этого видно, что увеличивается разброс значений коэффициента от средних значений. По-видимому, это связано с тем, что НДС ГП меняется не плавно, а ступенчато. Дискретный процесс разрушения не противоречит кинетической концепции прочности Журкова [27], в которой разрушение рассматривается как непрерывно развивающийся процесс, который начинается сразу после приложения к телу нагрузки, но макроразрушение происходит после инкубационного периода, в котором накапливаются критические микродефекты. Таким образом, разгрузка происходит после достижения некоторых критических значений упругих свойств горных пород.

Для наглядности и численных оценок разброса средних значений коэффициента, отражающего свойства горных пород, была рассчитана его дисперсия скользящим окном на пятиминутных интервалах (рис. 1, б). График иллюстрирует динамику изменения НДС ГП. После 17 ч UTC установилось некоторое равновесное состояние ГП. Вероятно, что напряжения сжатия в месте закачки ЖРО сохранились, но в отсутствие их динамики интенсивность ЕИЭМПЗ вернулась к фоновым значениям.

Второй эксперимент по регистрации интенсивности ЕИЭМПЗ проводился сразу после остановки закачки 8 ноября. Полевой регистратор был установлен в 10 м от нагнетательной скважины. В качестве вариационного

использовался регистратор, установленный в 60 м от полевого. Результаты расчета коэффициента, отражающего деформационные свойства ГП и его дисперсии на пятиминутных интервалах, представлены на рис. 2. В момент остановки закачки и в течение не-

скольких часов после нее происходит изменение НДС ГП, сопровождающееся аномальным импульсным полем, превышающем фоновые значения более чем в 10 раз, и повышенным разбросом значений коэффициента относительно средних значений.

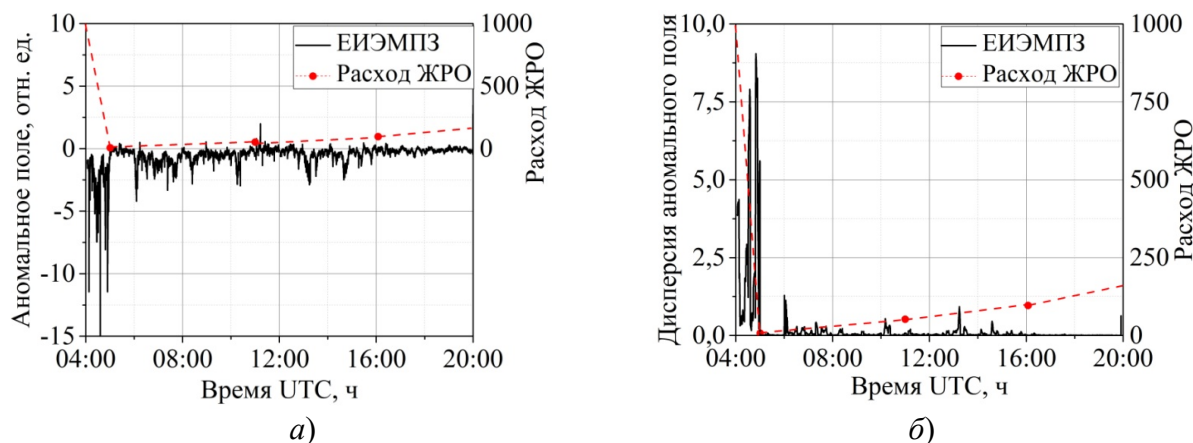


Рис. 1. Изменение параметров ЕИЭМПЗ при изменении режима работы нагнетательной скважины:

а) изменение коэффициента, отражающего деформационные свойства ГП; б) изменение дисперсии коэффициента на пятиминутных интервалах

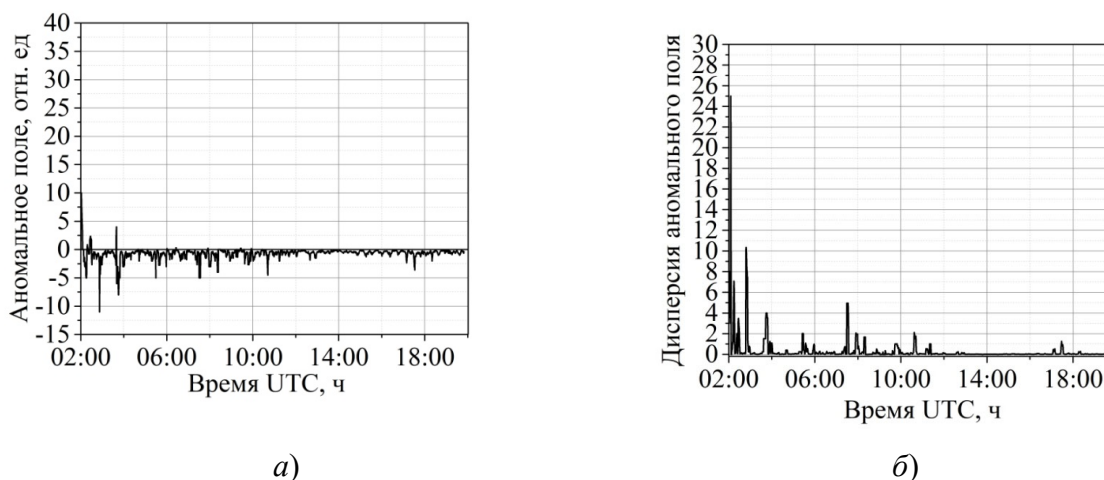


Рис. 2. Изменение параметров ЕИЭМПЗ в течение первых часов после остановки закачки в нагнетательную скважину:

а) изменение коэффициента, отражающего деформационные свойства ГП; б) изменение дисперсии коэффициента на пятиминутных интервалах

Третий эксперимент по регистрации интенсивности ЕИЭМПЗ проводился 10 ноября. К моменту начала регистрации закачка ЖРО в скважину не проводилась более двух суток. Полевой и вариационный регистраторы были установлены в тех же местах, где и в экспери-

менте при регистрации ЕИЭМПЗ в момент остановки закачки в нагнетательную скважину. Результаты расчета коэффициента, отражающего деформационные свойства ГП и его дисперсии на пятиминутных интервалах представлены на рис. 3. За время, прошедшее

с момента остановки скважины, произошла полная релаксация напряжений ГП. Значения коэффициента на уровне фоновых вариаций, дисперсия около нулевых значений. Интерес-

ным представляется факт того, что значения коэффициента, отражающего свойства ГП, со среднеотрицательных стали среднеположительными.

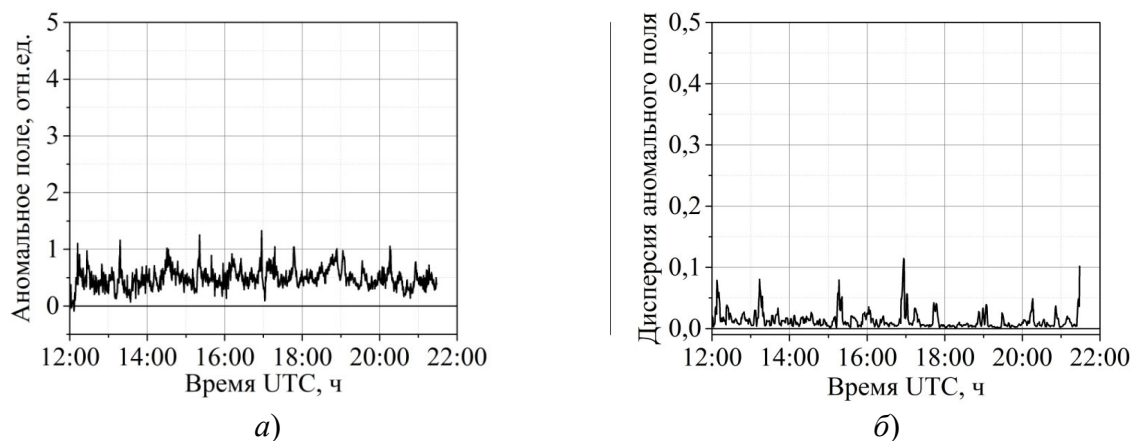


Рис. 3. Изменение параметров ЕИЭМПЗ после простоя нагнетательной скважины более двух суток:

а) изменение коэффициента, отражающего деформационные свойства ГП; б) изменение дисперсии коэффициента на пятиминутных интервалах.

Заключение

Исследования по оценке реакции геологической среды на изменение работы нагнетательной скважины ЖРО, впервые поставленные с использованием метода ЕИЭМПЗ, показали, что при изменении режима работы нагнетательной скважины происходит изменение НДС в массиве ГП, залегающем выше эксплуатационного горизонта. В работе предложены критерии оценки деформации ГП – коэффициент аномальности ЕИЭМПЗ и скорости их изменения – дисперсия коэффициента аномальности. Так как процесс изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород на ПГЗ ЖРО до конца не изучен, то необходимо продолжить исследования.

По результатам проведенных дополнительных исследований в рамках обработки

полученных фактических результатов предполагается выполнить геомеханическое моделирование напряженно-деформированного состояния пород при нагнетании жидких радиоактивных отходов в пласт-коллектор.

Благодарности

Авторы выражают признательность ведущему электронику ТУСУР С. Г. Шталину за помощь в создании и настройке исследовательской аппаратуры, сотруднику АО «Сибирский химический комбинат» Т. Ю. Заведий и сотруднику Геофизического центра РАН А. И. Маневичу за конструктивную критику при обсуждении результатов работы.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, проект №121031300155-8.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мастов Ш. Р., Саломатин В. Н., Яворович Л. В. Выявление степени деформации участков оползня методом регистрации импульсов электромагнитного поля // Инженерная геология. – 1983. – № 2. – С. 98–101.
2. Мастов Ш. Р., Гольд Р. М., Саломатин В. Н., Яворович Л. В. Изучение прогрессирующего разрушения при развитии оползневого процесса методом регистрации электромагнитных сигналов // Инженерная геология. – 1984. – № 1. – С. 68–71.

3. Малышков Ю. П., Гордеев В. Ф., Дмитриев В. П., Смирнов В. А., Фурса Т. В., Ульченко В. И. Закономерности генерирования электромагнитного сигнала твердыми телами при механическом воздействии // Журнал технической физики. – 1984. – Т. 54, Вып. 2. – С. 336–341.
4. Воробьев А. А., Защинский Л. А., Надежкин С. Г., Ширяев В. Ф. Импульсное электромагнитное поле, возникающее при деформациях грунтов в лабораторных условиях // Физикотехнические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1981. – № 5. – С. 119–120.
5. Malyshkov S. Yu., Gordeev V. F., Pustovalov N. A. Detailing the tectonic structure of a nuclear industry construction site using an Earth's natural pulsed electromagnetic field method // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 211. – 012077. – DOI 10.1088/1755-1315/211/1/012077.
6. Malyshkov Y. P., Malyshkov S. Yu., Gordeev V. F., Shtalin S. G., Polivach V. I., Krutikov V. A., Zaderigolova M. M. Earth's Natural Electromagnetic Noises: Their Deep-Seated Origin, Effect on People, Recording and Application in Geophysics. Editors: Reimer A. // Horizons in World Physics. – Nova Science Publishers, 2015. – Vol. 283. – P. 43–128.
7. Malyshkov S. Yu., Gordeev V. F., Pustovalov N. A. Detailing the tectonic structure of a nuclear industry construction site using an Earth's natural pulsed electromagnetic field method // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science – 2018. – Vol. 211. – P. 012077. – DOI 10.1088/1755-1315/211/1/012077.
8. Гордеев В. Ф., Малышков С. Ю., Крутиков В. А., Поливач В. И., Кабанов М. М., Капустин С. Н., Шталин С. Г., Пустовалов К. Н. Развитие пассивной радиоволновой информационно-измерительной технологии мониторинга динамических процессов взаимодействия литосферы, криосферы и атмосферы // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35, № 02. – С. 105–109. – DOI 10.15372/AOO20220204.
9. Малышков С. Ю., Гордеев В. Ф., Поливач В. И. Электромагнитный метод геофизических исследований многолетнемерзлых грунтов // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 26–35. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-26-36.
10. Гордеев В. Ф., Малышков С. Ю., Поливач В. И. Геофизический мониторинг опасных техногенных проявлений на подрабатываемых территориях // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 35–44. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-2-35-44.
11. Гордеев В. Ф., Поливач В. И., Малышков С. Ю. Метод естественного импульсного электромагнитного поля Земли для мониторинга динамики грунтов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 145–149.
12. Gordeev V. F., Malyshkov S. Yu., Krutikov V. A., Polivach V. I., Shtalin S. G. Lightning discharges bearing using dangerous geological processes monitoring system based on Earth's natural pulsed electromagnetic field parameters // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 211. – P. 012073. – DOI 10.1088/1755-1315/211/1/012073.
13. Беляев Л. М., Мартышев Ю. Н., Набатов В. В. О времени высвечивания в процессах трибо- и кристаллолюминесценции // Кристаллография. – 1962. – Т. 7, Вып. 4. – С. 576–580.
14. Гольд Р. М., Марков Г. П., Могила П. Г., Самохвалов М. А. Импульсное электромагнитное излучение минералов и горных пород, подверженных механическому нагружению // Физика Земли. – 1975. – № 7. – С. 109–111.
15. Дмитриевский В. С., Корнилов Л. Н. Частичные разряды при механическом разрушении твердых диэлектриков // Изв. Томского политехнического ин-та. – 1975. – Т. 222. – С. 12–15.
16. СП-11-105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
17. НП-055–14. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
18. Кокорев О. Н., Адонин Н. Р., Носков М. Д., Заведий Т. Ю., Щипков А. А. Автоматизированная система гидродинамического мониторинга для обеспечения экологической безопасности пункта глубинного захоронения ЖРО // Изв. вузов. Физика. – 2021. – Т. 64, № 2-2. – С. 46–51.
19. Кокорев О. Н., Козлов А. Е., Носков М. Д., Щипков А. А. Концепция умного полигона глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов // Изв. вузов. Физика. – 2018. – Т. 61, № 12-2 (732). – С. 45–49.
20. Кокорев О. Н., Спешилов С. Л. Анализ системы геотехнологического мониторинга пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов филиала «Северский» ФГУП «НО РАО» // Всероссийская конференция с международным участием «Геохимия окружающей среды» – ГеОС-2022 : сб. тезисов (Москва, 23–26 августа 2022 г.). – М. : ИМГРЭ, 2022. – С. 87–88.

21. Пронь И. А., Ткаченко А. В., Мартьянов В. В., Трофимова Ю. В., Яковлева И. В. Подход к мониторингу состояния недр и подземных сооружений и результаты мониторинга пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 4 (5). – С. 42–48.
22. Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. – М. : ИздАТ, 1994.
23. Malyshkov S. Yu, Gordeev V. F., Pustovalov N. A. Detailing the tectonic structure of a nuclear industry construction site using an Earth's natural pulsed electromagnetic field method // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 211. – P. 012077. – DOI 10.1088/1755-1315/211/1/012077.
24. Шталин С. Г., Гордеев В. Ф., Малышков С. Ю., Поливач В. И., Малышков Ю. П. Регистратор импульсных электромагнитных полей для мониторинга геодинамических процессов и геофизической разведки // Датчики и системы. – 2012. – № 4. – С. 32–37.
25. Малышков Ю. П., Гордеев В. Ф., Малышков С. Ю. Регистратор импульсных электромагнитных полей для геофизической разведки // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГГА, 2016. Т. 2. – С. 68–72.
26. Гордеев В. Ф., Малышков С. Ю., Крутиков В. А., Поливач В. И., Кабанов М. М., Капустин С. Н., Шталин С. Г., Пустовалов К. Н. Развитие пассивной радиоволновой информационно-измерительной технологии мониторинга динамических процессов взаимодействия литосферы, криосферы и атмосферы // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35, № 02. – С. 105–109. – DOI 10.15372/AOO20220204.
27. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. – 1968. – № 3. – С. 46–52.

Об авторах

Сергей Юрьевич Малышков – старший научный сотрудник.

Олег Николаевич Кокорев – геолог филиала «Северский».

Василий Федорович Гордеев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Виталий Игорьевич Поливач – научный сотрудник.

Получено 26.05.2023

© С. Ю. Малышков, О. Н. Кокорев, В. Ф. Гордеев, В. И. Поливач, 2023

Monitoring the stress-strain state of rock mass at underground liquid radioactive waste disposal

S. Yu. Malyshkov¹, O. N. Kokorev², V. F. Gordeev¹, V. I. Polivach¹*

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russian Federation

² National Operator for Radioactive Waste Management, Seversk, Tomsk region, Russian Federation

* e-mail: msergey@imces.ru

Abstract. Ensuring reliable isolation of nuclear industry radioactive waste is determined by the technology of their injection, as well as the geological conditions of the environment where the disposal is carried out. In order to confirm the localization of liquid radioactive waste within the established forecast boundaries and confirm the technically sound condition of underground structures, work is being carried out to monitor the state of the subsoil and underground structures. The obtained results of monitoring the state of the subsoil and underground structures are used as input data for verification of models developed and used to justify the long-term safety of models and, if necessary, optimization of disposal regimes. The purpose of the geophysical studies described in the article was to assess the response of the geological environment to a change in the operation of an injection well. The work was carried out by the method of the natural pulsed electromagnetic field of the Earth, which was used for these purposes for the first time. The results of assessing the change in the stress-strain state of rocks in response to changes in reservoir pressure are presented. The conducted studies have shown the high prospects of the method for geotechnological monitoring of deep disposal sites for nuclear industry waste. The paper proposes new criteria for assessing the stress-strain state of rocks.

Keywords: pulsed electromagnetic field, electromagnetic emission, stress-strain state, monitoring, liquid radioactive waste, well, geophysical research

REFERENCES

1. Mastov, Sh. R., Salomatin, V. N., & Javorovich, L. V. (1983). Identification of the degree of deformation of landslide sections by the method of registering electromagnetic field pulses. *Inzhenernaya geologiya [Engineering Geology]*, 2, 98–101 [in Russian].
2. Mastov, Sh. R., Gold, R. M., Salomatin, V. N., & Javorovich, L. V. (1984). Study of progressive destruction during the development of a landslide process by recording electromagnetic signals. *Inzhenernaya geologiya [Engineering Geology]*, 1, 68–71 [in Russian].
3. Malyshkov, Yu. P., Gordeev, V. F., Dmitriev, V. P., Smirnov, V. A., Fursa, T. V., & Ulchenko, V. I. (1984). Patterns of electromagnetic signal generation by solid bodies under mechanical action. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Technical Physics]*, 54(2), 336–341 [in Russian].
4. Vorobyov, A. A., Zashchinsky, L. A., Nadezhkin, S. G., & Shiryaev, V. F. (1981). Pulse electromagnetic field arising from soil deformations in laboratory conditions. *Fizikotekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh [Physicotechnical Problems of Mineral Development]*, 5, 119–120 [in Russian].
5. Malyshkov, S. Yu., Gordeev, V. F., & Pustovalov, N. A. (2018). Detailing the tectonic structure of a nuclear industry construction site using an Earth's natural pulsed electromagnetic field method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 211, P. 012077. DOI 10.1088/1755-1315/211/1/012077.
6. Malyshkov, Y. P., Malyshkov, S. Yu., Gordeev, V. F., Shtalin, S. G., Polivach, V. I., Krutikov, V. A., & Zaderigolova, M. M. (2015). Earth's Natural Electromagnetic Noises: Their Deep-Seated Origin, Effect on People, Recording and Application in Geophysics. A. Reimer (Ed.). *Horizons in World Physics*, 283, 4–128. Nova Science Publishers.
7. Malyshkov, S. Yu., Gordeev, V. F., & Pustovalov, N. A. (2018). Detailing the tectonic structure of a nuclear industry construction site using an Earth's natural pulsed electromagnetic field method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 211, P. 012077. DOI 10.1088/1755-1315/211/1/012077.
8. Gordeev, V. F., Malyshkov, S. Yu., Krutikov, V. A., Polivach, V. I., Kabanov, M. M., Kapustin, S. N., Shtalin, S. G., & Pustovalov, K. N. (2022). Information-measuring technology for monitoring the dynamic processes of interaction between the lithosphere, cryosphere and atmosphere. *Optika atmosfery i okeana [Optics of the Atmosphere and Ocean]*, 35(02), 105–109. DOI 10.15372/AOO20220204 [in Russian].
9. Malyshkov, S. Yu., Gordeev, V. F., & Polivach, V. I. (2019). Electromagnetic method of geophysical research of permafrost soils. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(3), 26–35. DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-26-36 [in Russian].
10. Gordeev, V. F., Malyshkov, S. Yu., & Polivach, V. I. (2019). Geophysical monitoring of dangerous technogenic manifestations in undermined territories. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 35–44. DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-2-35-44 [in Russian].
11. Gordeev, V. F., Polivach, V. I., & Malyshkov, S. Yu. (2016). The method of the natural pulsed electromagnetic field of the Earth for monitoring soil dynamics. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. T. 2. Distantionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 2. Remote Methods of Earth Sensing and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* (pp. 145–149). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
12. Gordeev V. F., Malyshkov S. Yu., Krutikov V. A., Polivach V. I., & Shtalin S. G. (2018). Lightning discharges bearing using dangerous geological processes monitoring system based on Earth's natural pulsed electromagnetic field parameters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 211, P. 012073. DOI 10.1088/1755-1315/211/1/012073.
13. Belyaev, L. M., Martyshev, Yu. N., & Nabatov, V. V. (1962). Study of the glow in the destruction of minerals. Flash times. In *Sbornik: Fizika shchelochno-galoidnykh kristallov [Proceedings of Physics of Alkali Galoid Crystals]* (pp. 179–182). Riga: Latv. University Publ. [in Russian].
14. Gold, R. M., Markov, G. P., Mogila, P. G., & Samokhvalov, M. A. (1975). Pulsed electromagnetic radiation of minerals and rocks subjected to mechanical loading. *Fizika Zemli [Physics of the Earth]*, 7, 109–111 [in Russian].
15. Dmitrevsky, V. S., & Kornilov, L. N. (1975). Partial discharges during mechanical destruction of solid dielectrics. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]*, 222, 12–15 [in Russian].

16. Code of Practice. SP 11-105-97. Engineering and geological surveys for construction: Part IV, Rules of work in areas of permafrost. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
17. Norms and Rules Code. NP 055-14. Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and basic safety requirements [in Russian].
18. Kokorev, O. N., Adonin, N. R., Noskov, M. D., Zavediy, T. Yu., & Shchipkov, A. A. (2021). Automated system of hydrodynamic monitoring to ensure the environmental safety of the facility for deep disposal of LRW. *Izvestiya vuzov. Fizika [Izvestiya Vuzov. Fizika]*, 64(2-2), 46–51 [in Russian].
19. Kokorev, O. N., Kozlov, A. E., Noskov, M. D., & Shchipkov, A. A. (2018). The concept of a smart polygon for deep disposal of liquid radioactive waste. *Izvestiya vuzov. Fizika [Izvestiya Vuzov. Fizika]*, 61(12-2(732)), 45–49 [in Russian].
20. Kokorev, O. N., & Speshilov, S. L. (2022). Analysis of the geotechnological monitoring system for a deep disposal facility for liquid radioactive waste of the Seversky branch of FSUE NO RAO. In *Sbornik tezisev Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: Geokhimiya okruzhayushchey sredy – GeOS-2022 [Collection of Abstracts All-Russian Conference with International Participation: Geochemistry of the Environment – GeOS-2022]* (87–88). Moscow: Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements Publ. [in Russian].
21. Pron, I. A., Tkachenko, A. V., Martyanov, V. V., Trofimova, Yu. V., & Yakovleva, I. V. (2018). Approach to monitoring the state of subsoil and underground structures and the results of monitoring deep disposal sites for liquid radioactive waste. *Radioaktivnye otkhody [Radioactive Waste]*, 4(5), 42–48 [in Russian].
22. Rybalchenko, A. I., Pimenov, M. K., Kostin, P. P., & et al. (1994). *Glubinnoe zakhoronenie zhidkikh radioaktivnykh otkhodov [Deep burial of liquid radioactive waste]*. Moscow: IzdAT Publ. [in Russian].
23. Malyshkov S. Yu., Gordeev, V. F., & Pustovalov, N. A. (2018). Detailing the tectonic structure of a nuclear industry construction site using an Earth's natural pulsed electromagnetic field method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 211, P. 012077. DOI 10.1088/1755-1315/211/1/012077.
24. Shtalin, S. G., & et al. (2012). Recorder of pulsed electromagnetic fields for monitoring geodynamic processes and geophysical prospecting. *Datchiki i sistemy [Sensors and Systems]*, 4, 32–37 [in Russian].
25. Malyshkov, Yu. P., Gordeev, V. F., & Malyshkov, S. Yu. (2016). Recorder of pulsed electromagnetic fields for geophysical exploration. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 2. Subsoil Use. Mining Engineering. Directions and Technologies of Prospecting, Exploration and Development of Mineral Deposits. Geoecology]* (pp. 68–72). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
26. Gordeev, V. F., Malyshkov, S. Yu., Krutikov, V. A., Polivach, V. I., Kabanov, M. M., Kapustin, S. N., Shtalin, S. G., & Pustovalov, K. N. (2022). Information-measuring technology for monitoring the dynamic processes of interaction between the lithosphere, cryosphere and atmosphere. *Optika atmosfery i okeana [Optics of the Atmosphere and Ocean]*, 35(02), 105–109. DOI 10.15372/AOO20220204 [in Russian].
27. Zhurkov, S. N. (1968). Kinetic concept of strength of solids. *Vestnik AN SSSR [Bulletin of the USSR Academy of Sciences]*, 3, 46–52 [in Russian].

Author details

Sergey Yu. Malyshkov – Senior Researcher.
Oleg N. Kokorev – Geologist the Branch "Severskiy".
Vasily F. Gordeev – Ph. D., Senior Researcher.
Vitaly I. Polivach – Researcher.

Received 26.05.2023

© S. Yu. Malyshkov, O. N. Kokorev, V. F. Gordeev, V. I. Polivach, 2023