DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-23-27 УДК 621.039.(58:7)

# РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИЦЕНЗИОННЫХ УЧАСТКОВ НЕДР ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ЖИДКИМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ ПРИ ИХ ЗАХОРОНЕНИИ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ

**М. Ю. Бамборин, В. В. Мартьянов, А. Н. Каманин, А. В. Минин**

**ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», Москва**

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2022 г.

*В работе рассматривается структура пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов, схема их распространения в пределах горного отвода и технические решения, позволяющие перераспределить фильтрационный поток путем применения барражных закачных и откачных скважин или наблюдательных и резервных скважин для возможного обеспечения длительной безопасной эксплуатации объекта.*

**Ключевые слова:** *радиационная безопасность, захоронение радиоактивных отходов, радиоактивные отходы, жидкие радиоактивные отходы, водоносный горизонт, минерализация, удельная активность, горный отвод, фильтрационный поток, барражная закачная скважина, барражная откачная скважина.*

Решение о захоронении жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в недра было принято в сентябре 1958 г. на закрытом заседании Совета Министров СССР Постановлением «О проведении исследований по захоронению радиоактивных отходов радиохимических заводов». В октябре 1960 г. распоряжением Совета Министров СССР было принято решение «О возложении на Министерство среднего машиностроения СССР и Министерство геологии и освоения недр СССР обеспечения подземного захоронения радиоактивных отходов».

Пункты глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов (ПГЗ ЖРО) были созданы к середине 60-х годов на объектах в Волжском регионе, Западной и Восточной Сибири.

В структуру ПГЗ ЖРО были включены системы нагнетательных, откачных (разгрузочных), наблюдательных, резервных скважин, цеха подготовки ЖРО к критериям приемлемости для закачки в недра, насосные станции перекачки и нагнетания и другие необходимые технологические объекты. Эксплуатация ПГЗ ЖРО была начата в конце 60-х годов. В настоящее время объемы закачиваемых ЖРО составляют от нескольких десятков до нескольких тысяч куб. метров в сутки.

Процесс захоронения ЖРО регламентируется Федеральным законом «Об использовании атомной энергии» [1] и законом РФ «О недрах» [2], а также утвержденными Ростехнадзором нормами и правилами (НП) [3], [4]. В своей производственной деятельности предприятия, эксплуатирующие ПГЗ ЖРО, работают в соответствии с условиями действия лицензий (УДЛ), выданными Ростехнадзором, и с условиями

пользования недрами (УПН), выданными Федеральным агентством по недропользованию (Роснедра), а также в соответствии с внутренними регламентами, обеспечивающими безопасную эксплуатацию ПГЗ ЖРО.

Применение способа глубинного захоронения ЖРО в геологические формации ограничено определенными положениями, в частности:

- водоносные горизонты, в которые производится закачка ЖРО, должны обеспечивать прием заданного количества жидких отходов;
- водоупоры, изолирующие пласт-коллектор (естественные барьеры ПГЗ ЖРО), должны обладать низкими фильтрационными свойствами и ограничивать распространение радионуклидов в выше- и нижележащие водоносные горизонты;
- физико-химические свойства закачиваемых ЖРО должны быть совместимы с пластовыми геохимическими условиями;
- минерализация (общее солесодержание) ЖРО не должна превышать 450 г/дм$^3$, содержание солей органических кислот — не более 150 г/дм$^3$, нитратов, сульфатов и хлоридов натрия — не более 350 г/дм$^3$, мелкодисперсных взвешенных твердых частиц — не более 0,1 г/дм$^3$ [3], [4];
- формирование ореолов распространения ЖРО в недрах должно происходить в пределах горного отвода в соответствии с лицензией УПН.

С конца 60-х годов по настоящее время в недра в пределах горных отводов было закачано несколько миллионов куб. метров ЖРО, в результате чего сформировались ореолы их распространения.

На рис. 1 показана схема распространения ЖРО одного из ПГЗ ЖРО с производительностью закачки 60 000 м$^3$/год на моменты времени 10, 20 и 50 лет.

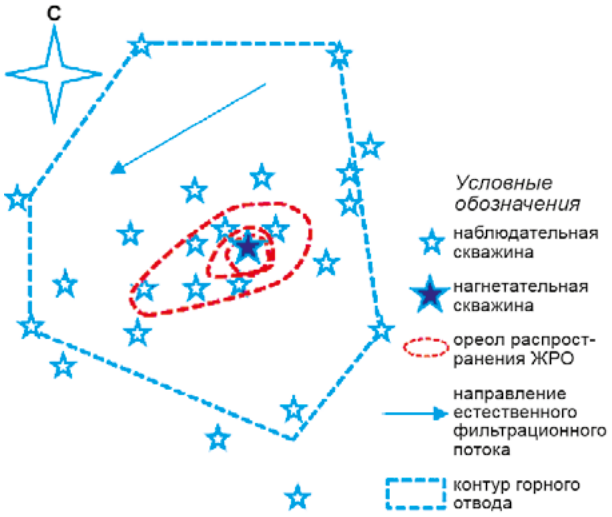


*Рис. 1. Ореол распространения ЖРО*

Из приведенных на рис. 1 данных следует, что начиная с определенного времени контур ореола ЖРО ориентируется строго по направлению естественного регионального фильтрационного потока, не распространяясь на периферийные участки горного отвода.

В северо-восточной части горного отвода скорость распространения ЖРО $V_1$ становится сопоставимой со скоростью естественного фильтрационного потока $V_2$, вызывая торможение потока загрязнителя (1), т. е.:

$$V_1 = V_2, \quad (1)$$

$$V_1 = k\,\Delta H/\Delta X\text{, где } \Delta H = \frac{Q}{4\pi km}\ln\frac{T+\Delta T}{T}, \quad (2)$$

$$V_2 = kJ_0. \quad (3)$$

В преобразованных уравнениях Тейса и Дарси (2) и (3) [5]:

$Q$ — дебит закачки;

$k$ — коэффициент фильтрации;

$m$ — мощность пласта-коллектора;

$\Delta H$ — изменение уровня подземных вод за время $\Delta t$ при перемещении фронта распространения ЖРО на расстояние $\Delta X$;

$J_0$ — градиент естественного фильтрационного потока;

$T$ — текущее время.

В юго-западной части скорость распространения ЖРО суммируется со скоростью естественного фильтрационного потока, формируя вытянутую эллипсовидную структуру (сложение равнонаправленных векторов скорости фильтрационного потока).

Формирование такой структуры распространения ореола ЖРО может привести, на наш взгляд, к нерациональному использованию территории выделенного лицензионного участка (горного отвода). Для более полного и целесообразного применения участка недр предлагается использовать технические решения по перераспределению фильтрационных потоков с помощью сооружения дополнительных барражных закачных и откачных скважин или существующих наблюдательных и резервных скважин.

На рис. 2 приведена карта гидроизогипс фильтрационного потока, сформировавшегося в результате эксплуатации группы из шести технологических скважин с дебитами закачки $Q_i$, меняющимися от 37 до 100 м$^3$/сут, на фоне естественного гидродинамического потока $J_0 = 0{,}0017$, направленного с востока на юго-запад. При построении фильтрационных полей использовалась математическая среда Mathcad 14,

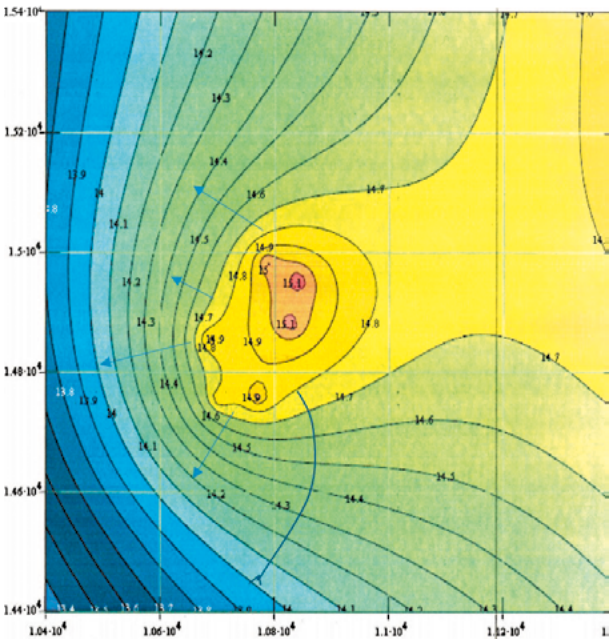

*Рис. 2. Карта гидроизогипс фильтрационного потока в пределах участка горного отвода*

а при вводе исходных данных — преобразования Тейса [5] для группы скважин (4):

$$S(x,y)=\sum_{i=1}^{N}\frac{Q_i\ln\frac{2,25at}{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}}{4\pi km}+\Delta H(x,y), \quad (4)$$

где: $S$ — значения УПВ в плане ($x$, $y$),
$Q_i$ — расход $i$-й скважины,
$a$ — коэффициент пьезопроводности,
$t$ — время эксплуатации скважин,
$x_i$, $y_i$ — координаты скважин,
$\Delta H(x, y)$ — комплексный параметр, учитывающий градиент и направление естественного фильтрационного потока.

На увеличение частоты линий гидроизогипс (рис. 2) показывает основное направление потока в юго-западном направлении, так же ориентирован ореол распространения ЖРО.

Для рационального перераспределения ореолов распространения ЖРО возможно применение двух технологических решений: растягивание по фронту в крест простирания потока и включение временного реверса через фронтальные (принудительная закачка) и тыловые (принудительная откачка) скважины. Очевидно, что выбор способа будет зависеть от конкретного местоположения ореолов ЖРО (ближе или дальше от внутренних границ горного отвода, ориентация по потоку или нет) и геолого-гидрогеологических свойств пород, обеспечивающих определенные дебиты закачки и откачки (рис. 3).

На рис. 4 и 5 показаны фильтрационные поля, сформированные в результате эксплуатации групп скважин различного назначения.

*Рис. 3. Скважинные схемы для перераспределения ореолов ЖРО в пределах горного отвода*

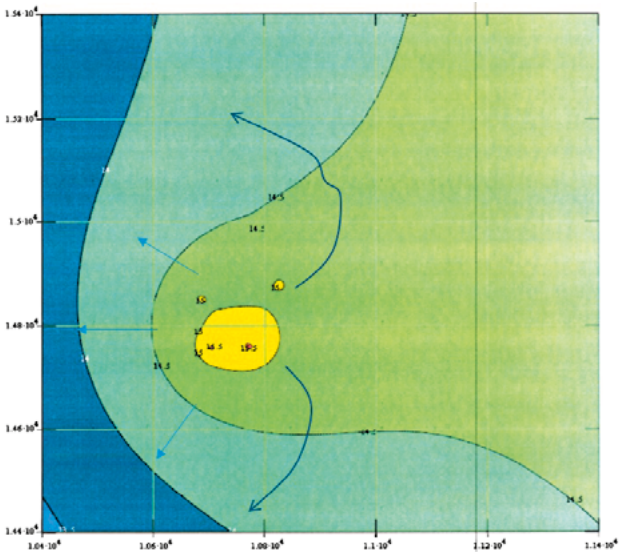

*Рис. 4. Фильтрационное поле, сформированное группой из 8 (четырех закачных и четырех откачных) барражных скважин, при продолжающейся эксплуатации шести технологических скважин (вариант А)*

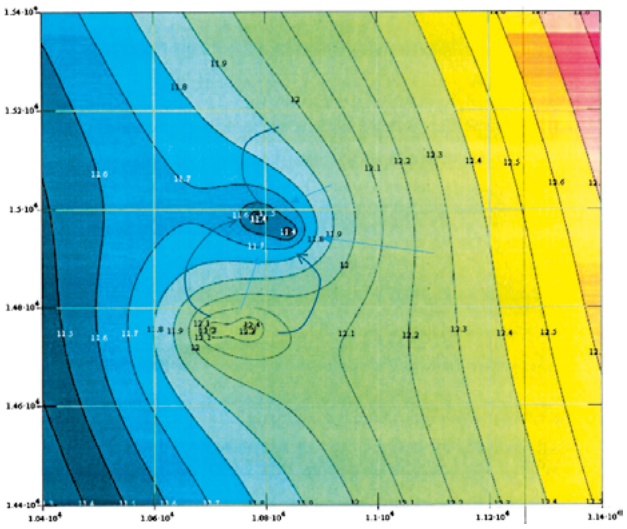

*Рис. 5. Фильтрационное поле, сформированное группой из 8 (четырех закачных и четырех откачных) барражных скважин, при временном выводе из работы шести технологических скважин (вариант Б)*

Как следует из форм построенных фильтрационных полей, в результате эксплуатации групп барражных скважин происходит изменение структуры фильтрационного потока. При этом (вариант А), судя по разрежению линий гидроизогипс, многократно уменьшается скорость фильтрационного потока в юго-западном направлении, а значит, зона формирования ореола РАО должна стабилизироваться в области влияния технологических скважин. В случае варианта Б основной фильтрационный поток начинает формироваться в области влияния барражных закачных и откачных скважин, тем самым временно препятствуя возможному перемещению ореола ЖРО в юго-западном направлении.

Таким образом, изменяя направления фильтрационного потока в области формирования ореолов ЖРО, можно их перераспределить в пределах горного отвода. (Вопросы массопереноса и сорбционно-десорбционных процессов здесь не рассматриваются).

Для успешного применения вышеизложенных технических решений необходимо пользоваться определенными критериями, применяемыми к эксплуатации барражных скважин:

- местоположение скважин должно быть обоснованным и зависеть от морфологии ореолов ЖРО и их местоположения относительно границ лицензионных участков (горных отводов);
- значения дебитов барражных скважин должны быть подтверждены и связаны с геолого-гидрогеологическим условиями, позволяющими не допускать вертикальных перетоков из эксплуатационного в вышележащие водоносные горизонты при формировании воронок репрессии и депрессии.

В обоих случаях формирующийся фильтрационный градиент $J$ не должен превышать критического значения градиента $J_0$ [5], при котором может происходить переток жидкой фазы между водоносными горизонтами, т. е.

$$J < \Delta H/m - 4/3J_0. \quad (5)$$

продолжительность закачки и откачки должна контролироваться посредством наблюдательных скважин с недопущением попадания компонентов ЖРО в откачные скважины.

## Заключение

Внедрение предложенных технических решений по перераспределению фильтрационных потоков с помощью сооружения дополнительных барражных закачных и откачных скважин или использования существующих наблюдательных и резервных скважин позволит более полно и рационально задействовать существующие участки недр, обеспечить их соответствие современному нормативному регулированию и гарантировать возможность дальнейшей безопасной эксплуатации объектов еще на длительный период времени.

## Литература

1. Федеральный закон от 21 ноября 1995 года № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии».
2. Закон Российской Федерации от 21.02.1992 № 2395-1 «О недрах».
3. НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Захоронение радиоактивных отходов, принципы, критерии и основные требования безопасности.
4. НП-093-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения.
5. Гидрогеодинамика : учебник / В. М. Шестаков. — М. : Книжный дом Университет, 2009. 334 с.

## Информация об авторах

*Бамборин Михаил Юрьевич,* кандидат технических наук, директор департамента лицензирования и разрешительной деятельности, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: MYBamborin@norao.ru.

*Мартьянов Владимир Владимирович,* кандидат технических наук, эксперт, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: VVMartyanov@norao.ru.

*Каманин Антон Николаевич,* начальник отдела, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: ANKamanin@norao.ru.

*Минин Андрей Васильевич,* заместитель генерального директора по лицензированию и разрешительной деятельности, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: AVMinin@norao.ru.

## Библиографическое описание статьи

*Бамборин М. Ю., Мартьянов В. В., Каманин А. Н., Минин А. В.* Рациональное использование лицензионных участков недр при обращении с жидкими радиоактивными отходами при их захоронении в геологических формациях // Радиоактивные отходы. 2023. № 1 (22). С. 23—27. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-23-27.

# EFFICIENT USE OF LICENSED SUBSURFACE SITES IN THE MANAGEMENT OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE DURING ITS GEOLOGICAL DISPOSAL

**Bamborin M. Yu., Martyanov V. V., Kamanin A. N., Minin A. V.**

**National Operator for Radioactive Waste management FSUE, Moscow, Russia**

Article received on September 5, 2022

*The paper considers the structure of a deep disposal facility for liquid radioactive waste, the diagram of liquid radioactive waste spread within the mining allotment, and technical solutions enabling filtration flow redistribution through the use of barrage injection and extraction wells or observation and backup wells to provide long-term safe operation of the facility.*

**Keywords:** *radiation safety, radioactive waste disposal, radioactive waste, liquid radioactive waste, aquifer, mineralization, specific activity, mining allotment, filtration flow, barrage injection well, barrage pumping well, filtration field, well, funnel.*

## References

1. Federal'nyy zakon ot 21 noyabrya 1995 goda No. 170-FZ *"Ob ispol'zovanii atomnoy energii"* [Federal Law of November 21, 1995 No. 170-FZ "On Atomic Energy Use"].
2. Zakon Rossiiskoi Federatsii ot 21 fevralya 1992 goda No. 2395-1 *"O nedrakh"* [Law of the Russian Federation of February 21, 1992 No. 2395-1 "On Subsoil"].
3. NP-055-14. *Federal'nyye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii. Zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov, printsipy, kriterii i osnovnyye trebovaniya bezopasnosti* [Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use. Radioactive Waste Disposal. Principles, Criteria and Basic Safety Requirements].
4. NP-093-14. *Federal'nyye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii. Kriterii priyemlemosti radioaktivnykh otkhodov dlya zakhoroneniya* [Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use. Acceptance Criteria for Radioactive Waste Disposal].
5. *Gidrogeodinamika: uchebnik* [Hydrogeodynamics: textbook]. V. M. Shestakov. Moscow, Knizhnyi dom Universitet Publ., 2009. 334 p.

## Information about the authors

*Bamborin Mikhail Yurievich,* PhD, Director of the Licensing and Permitting Activities Department, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: MYBamborin@norao.ru.

*Martyanov Vladimir Vladimirovich,* PhD, expert, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: VVMartyanov @norao.ru.

*Kamanin Anton Nikolaevich,* Section head, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: ANKamanin @norao.ru.

*Minin Andrey Vasilievich,* Deputy General Director for Licensing and Permitting Activities, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: AVMinin@norao.ru.

## Bibliographic description

Bamborin M. Yu., Martyanov V. V., Kamanin A. N., Minin A. V. Efficient Use of Licensed Subsurface Sites in the Management of Liquid Radioactive Waste During Its Geological Disposal. *Radioactive Waste,* 2023, no. 1 (22), pp. 23—27. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-23-27. (In Russian).