

УДК 502.7:556.3.06:621.039.75

## УСЛОВИЯ, ПОСЛЕДСТВИЯ И ПУТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАКОЛОННЫХ ПЕРЕТОКОВ ЖИДКОСТЕЙ ПО СТВОЛАМ СКВАЖИН НА УЧАСТКАХ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

© 2019 г. А. В. Понизов<sup>1,\*</sup>, П. М. Верещагин<sup>1</sup>, Н. В. Чулков<sup>1</sup>, М. К. Шарпута<sup>2,\*\*</sup>, Е. А. Байдарико<sup>3,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»,  
ул. Малая Красносельская, 2/8, к. 5, Москва, 107140 Россия

\*E-mail: ponizov@secnrs.ru

<sup>2</sup>АО «ВНИПИ промтехнологии», Каширское шоссе, 33, Москва, 115409 Россия

\*\*E-mail: sharaputa.M.K@vnipt.ru

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*\*\*E-mail: hydrogeo@mail.ru

Поступила в редакцию 01.11.2018 г.

В статье рассматриваются основные методы обнаружения, признаки, геолого-технические условия, факторы и возможные прогнозные последствия развития заколонных перетоков компонентов жидких радиоактивных отходов (ЖРО) по стволам скважин на участках глубинного захоронения ЖРО. На основе результатов моделирования реального случая перетекания компонентов ЖРО показаны закономерности развития перетоков в интервалах скважин, характеризующихся повышенной проницаемостью цементного камня. Концентрация компонентов ЖРО в таких интервалах существенно изменяется во времени и зависит не только от их текущей концентрации в отходах и проницаемости среды, но и от градиента напора, направление и абсолютное значение которого определяются режимом эксплуатации скважины и естественными гидрогеологическими условиями.

Отмечено, что перетоки подземных вод и компонентов ЖРО формируются преимущественно в нагнетательных скважинах над их фильтром и кровлей водоносного горизонта, используемого для захоронения ЖРО (эксплуатационного горизонта). Перетоки приводят к техногенным изменениям геологической среды, которые имеют локальный характер в пространстве и во времени, и снижают безопасность таких объектов, как пункты глубинного захоронения ЖРО.

Предотвращение образования вертикальных каналов повышенной проницаемости вокруг стволов скважин и развития по ним перетоков возможно путем совершенствования конструкции и конструкционных материалов скважин, корректировки режима захоронения ЖРО и другими способами, включая применение новых тампонажных материалов и уточнение технических решений по ликвидации скважин.

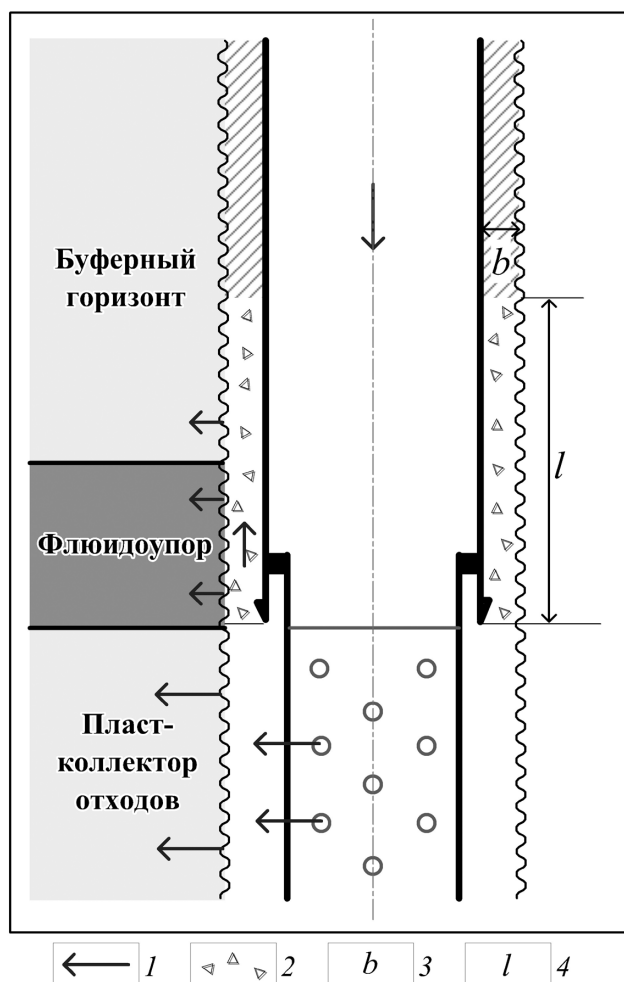
**Ключевые слова:** глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов, ПГЗ ЖРО, заколонный переток, нагнетательная скважина, цементный камень, геомиграционное моделирование.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019256-67>

### ВВЕДЕНИЕ

Технология глубинного захоронения жидких отходов широко применяется в различных отраслях промышленности. Буровые скважины на участках захоронения различных промышленных стоков, в том числе жидких радиоактивных отходов (ЖРО), в глубоководные геологические горизонты — обязательные и незамени-

мые подземные инженерные сооружения. Они нарушают природную изолированность вскрытых ими водоносных горизонтов и могут быть каналами, по которым развивается процесс заколонного межпластового перетекания природных и техногенных флюидов. Под заколонным перетоком понимается процесс вертикального восходящего или нисходящего движения флюидов из одного водоносного горизонта в другой



**Рис. 1.** Геолого-технический разрез нагнетательной скважины с каналом закоронного перетекания жидкостей. 1 – направление движения жидкостей; 2 – интервал разрушенного цемента; 3 – толщина цементного кольца; 4 – длина канала перетекания.

за обсадной колонной труб скважины, как правило, по интервалам негерметичного затрубного пространства (рис. 1) [5]. Развитие восходящего перетекания в ряде случаев приводит к негативным последствиям — загрязнению неглубокозалегающих пресных подземных и поверхностных вод, а также земной поверхности [1, 9]. Возникновение перетоков компонентов отходов, захороненных в недрах, снижает уровень социальной приемлемости данного способа обращения с отходами, а также снижает безопасность таких природно-техногенных объектов, как пункты и полигоны глубинного захоронения отходов (ПГЗ ЖРО).

Цель научно-практических исследований — обобщение и развитие представлений об условиях и факторах формирования, пространственно-временных закономерностях и последствиях

процесса закоронного перетекания радиоактивных компонентов отходов.

Выводы и рекомендации, сделанные авторами, могут быть полезны для решения задач геологического и экологического характера, связанных с сооружением, эксплуатацией и ликвидацией скважин на участках подземного захоронения жидких отходов и сточных вод.

## МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основными материалами для исследований являлись результаты геолого-разведочных и специальных гидрогеологических работ, а также данные мониторинга состояния недр и технического состояния скважин на ПГЗ ЖРО в районе г. Железнодорожска Красноярского края (далее — ПГЗ ЖРО «Железнодорожский»).

Для исследований использовались общие методы и приемы экспериментально-теоретического уровня. Методика проведения исследований состояла из следующих этапов:

- 1) анализ условий, факторов и последствий развития закоронных перетоков на различных участках захоронения отходов и стоков;
- 2) анализ и обобщение условий и причин возникновения каналов и перетоков;
- 3) аналитические расчеты и математическое моделирование перетекания отходов в условиях ПГЗ ЖРО «Железнодорожский»;
- 4) уточнение и обобщение направлений и способов предотвращения образования каналов и развития по ним перетоков.

## УСЛОВИЯ И ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ КАНАЛОВ В СКВАЖИНАХ

На участках захоронения отходов основными типами скважин являются нагнетательные и наблюдательные. Все скважины характеризуются сходными двух- или трехколонными конструкциями, в которых межтрубное и затрубное пространство зацементировано от башмака до устья [4, 14]. Цементный раствор, который приготавливается на основе портландцемента и нагнетается в затрубное пространство скважин под высоким давлением, после твердения представляет собой пористый, но практически водонепроницаемый камень. Например, по результатам исследований, коэффициент газовой проницаемости образцов цементного камня, приготовленного на основе барийсодержащего сульфатстойкого тампонажного цемента, составляет порядка  $10^{-18} \text{ м}^2 \approx 9 \cdot 10^{-6} \text{ Д}$ , что примерно соответствует коэффициенту фильтрации  $10^{-6} \text{ м/сут}$  [3].

Заколонный переток начинается по каналам повышенной проницаемости и пористости, которые образуются в затрубном пространстве скважин как на этапе застывания цементного раствора, так и после его отверждения. Каналами являются интервалы разрушенного и отсутствующего цементного камня, а также плохого качества его сцепления с горной породой и обсадными трубами. Наибольшему риску образования каналов подвержен контакт «обсадная колонна - цементный камень» [7]. Возникновение проницаемых каналов вызвано в основном техногенными факторами и является следствием физических и химических процессов, оказывающих воздействие на инженерные элементы скважины и окружающие ее геологические слои [1, 3, 6, 11, 12, 14]. Сочетание процессов и их воздействие, длительность и интенсивность в каждой конкретной скважине различны, но последствия общие — изменение первоначальных состава, структуры и свойств инженерных элементов скважины, горных пород и подземных вод, изменение напряженно-деформированного состояния отдельных участков и всего ствола скважины в целом. Разрушению цементного камня и образованию каналов за стенкой скважины могут способствовать изначально невысокое качество затрубной цементации, геодинамические явления при нагнетаниях жидкостей на небольшие глубины (до 300 м), а также различные кратковременные виды работ: опрессовка колонн, перфорация, кислотная обработка, откачка воды с выносом песка, гидроразрывы [14]. Учитывая, что на участках захоронения отходов и стоков наибольшему техногенному воздействию подвергаются нагнетательные скважины, вероятность образования в них каналов и развития перетоков выше, чем в других типах скважин. Практика эксплуатации ПГЗ ЖРО подтверждает данный вывод: случаи образования каналов и возникновения заколонных перетоков были отмечены преимущественно в нагнетательных скважинах. Случаи перетоков по стволам наблюдательных скважин были выявлены в скважинах, расположенных вблизи нагнетательных скважин, т.е. в области наибольшего техногенного воздействия.

Наряду с факторами, которые способствуют образованию каналов и развитию перетоков по ним, существуют значимые геологические факторы, предотвращающие и ограничивающие данный процесс — эффект кольматации, ползучесть пластичных глин, проявление горного и пластового давлений, которые приводят к смыканию и заполнению трещин и других пустот горными породами вокруг ствола скважин и даже к смятию обсадных труб [2].

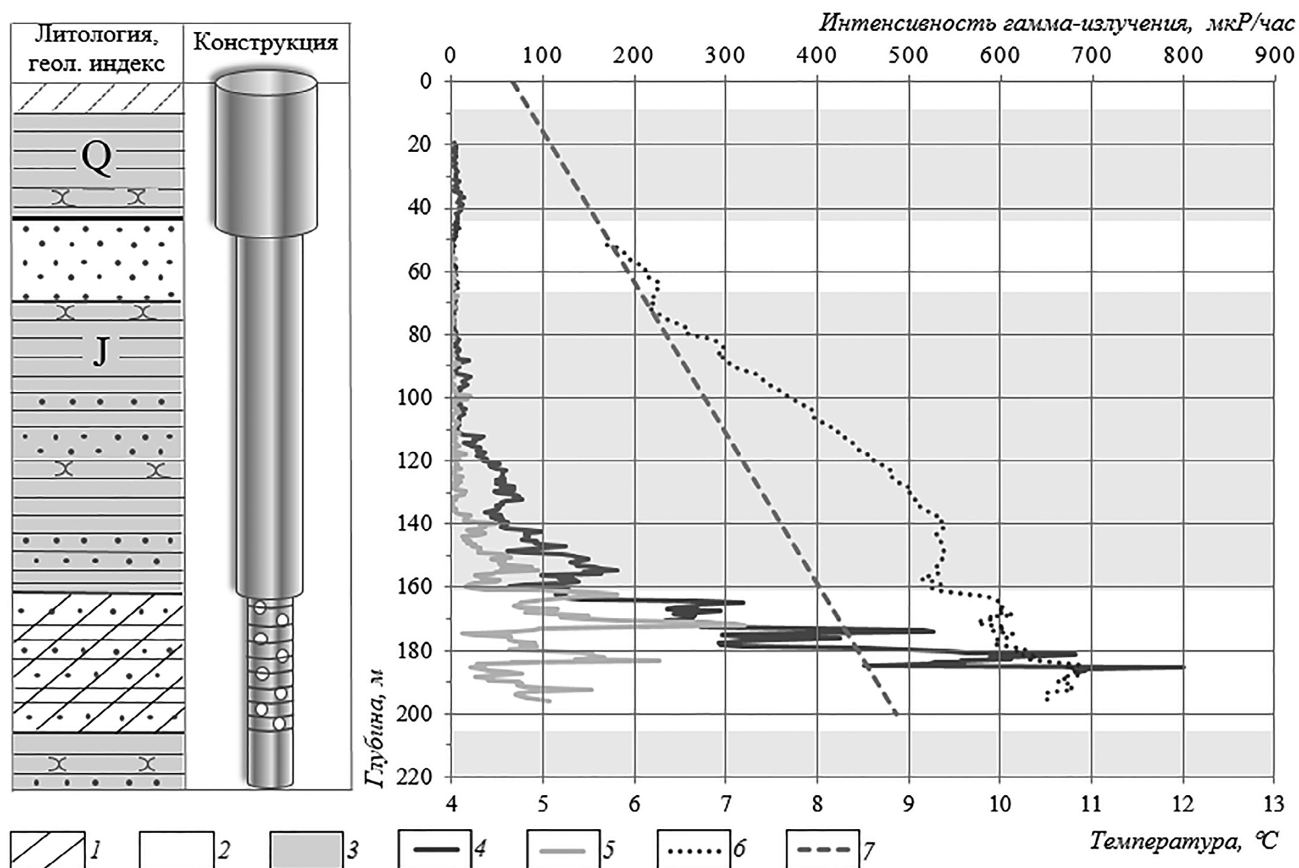
## ПРИЗНАКИ, ФАКТОРЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ РАЗВИТИЯ ЗАКОЛОННЫХ ПЕРЕТОКОВ

Методы и методики определения признаков, интервалов и направления затрубного перетекания жидкостей разработаны и детально изложены в специализированной литературе и нормативно-методических документах [13, 15]. На участках захоронения отходов и стоков признаками перетоков являются изменения температуры и интенсивности гамма-излучения относительно естественных, выявляемые методом термометрии и гамма-каротажа в исследуемой скважине. Кроме этого, на перетоки указывают появление гидравлической взаимосвязи между пластами и характер реакции уровня подземных вод в соседних скважинах в вышележающем водоносном горизонте.

В качестве фактора развития перетоков в опубликованной литературе часто указываются всевозможные причины, не связанные с физической сущностью этого процесса, как, например, неисправность устьевого оборудования, нарушение требований безопасности и др. [1, 12, 14]. Исходя из определения терминов «фактор» и «заколонный переток», фактором развития перетока следует считать движущую силу — градиент напора, который вызывает движение флюидов по затрубному пространству скважины от областей с большим напором к областям с меньшим напором при наличии канала фильтрации.

По сравнению с методами и методиками обнаружения перетоков геолого-технические условия и пространственно-временные закономерности развития перетока на примере конкретных скважин освещены в литературе в меньшей степени. В основном указывается факт наличия или ликвидации перетока по стволам дефектных скважин, причем большинство случаев перетекания выявлено или предполагается в нагнетательных или поглощающих скважинах на объектах захоронения стоков в нефтегазовой отрасли [9]. В отношении случаев перетоков компонентов отходов на ПГЗ ЖРО отмечен локальный пространственно-временной масштаб их последствий без количественной характеристики процесса перетекания и области воздействия [14]. Также в литературе недостаточно внимания уделено анализу геолого-технических условий перетоков и оценке фильтрационно-емкостных свойств цементного камня скважин.

Указанные слабоизученные аспекты процесса заколонного перетока тем не менее важны для обоснования и разработки эффективных мер обнаружения, предотвращения и ликвидации перетоков компонентов (особенно радиоактивных) отходов на участках их глубинного захоронения.



**Рис. 2.** Признаки заколонного восходящего перетекания компонентов отходов по стволу скважины Н-10 по данным гамма-каротажа и термометрии. 1 – эксплуатационный горизонт; 2 – водоносные горизонты; 3 – слабопроницаемые толщи; данные гамма-каротажа: 4 – 2012 г., 5 – 2008 г.; 6 – данные термометрии 2008 г.; 7 – базовая термограмма.

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ ЗАКОЛОННОГО ПЕРЕТОКА НА ПГЗ ЖРО «ЖЕЛЕЗНОГОРСКИЙ»

#### Краткая характеристика геолого-технических условий и особенностей перетекания

Детальный анализ процесса перетекания выполнен на примере скважины Н-10, который был выявлен 20 лет назад, в 1997–1998 гг., после 30 лет ее эксплуатации. Важно отметить, что на ПГЗ ЖРО «Железнодорожный» за последние 30 лет было обнаружено всего 2 случая заколонного перетока жидкостей (в нагнетательных скважинах Н-9 и Н-10).

Скважина Н-10 глубиной 225 м сооружена в 1968 г. для нагнетания ЖРО в среднеитатский водоносный горизонт юрской системы ( $J_2it^2$ ), сложенный песчано-глинистыми отложениями, в интервал глубин 161–205 м (рис. 2). Эксплуатационный горизонт вмещает пресные подземные воды с температурой 8–9°C, перекрыт двумя слабопроницаемыми глинистыми толщами общей мощностью 90 м. Глубина залегания естествен-

ного уровня напорных подземных вод горизонта 45 м, пластовое давление 1.76 МПа.

Скважина имеет трехколонную конструкцию, которая включает кондуктор, эксплуатационную и фильтровую колонны стальных труб. Нагнетание ЖРО низкого уровня активности (НАО) производилось в Н-10 в период 1973–2011 гг. в прерывистом режиме с расходом до 400 м<sup>3</sup>/сут под давлением до 0.8 МПа на устье.

По данным геофизических исследований в скважине Н-10, многократно выполненных методами гамма-каротажа, термометрии, акустической цементометрии, были обнаружены и подтверждены ухудшение качества затрубной цементации над кровлей эксплуатационного горизонта и фильтром скважины, а также признаки заколонного восходящего перетекания подземных вод и радиоактивных компонентов захороненных отходов: превышение фоновых значений интенсивности гамма-излучения и температуры пород (см. рис. 2). Выполненные в 2008 г. ремонтно-восстановительные работы (далее – РВР) не обеспечили надежной

изоляции эксплуатационного горизонта от вышележащих горизонтов и, вероятно, способствовали дальнейшему разрушению цементного камня и улучшению его фильтрационно-емкостных свойств. После 2012 г. отмечены стабилизация размера области вертикальной миграции компонентов отходов вверх по стволу скважины и тенденция ее уменьшения.

#### *Схематизация общих природно-технических условий*

На основе результатов выполненного ретроспективного анализа данных мониторинга авторами в 2015 г. была разработана математическая гидрогеологическая (геофильтрационная и гидрогеомиграционная) сеточная модель. Пространственно-временная вычислительная сетка была построена с учетом фактических природно-технических условий ПГЗ ЖРО. Расчетный период времени состоял из двух основных этапов: образования канала перетекания и развития перетока (1996–2016 гг.) и постэксплуатационного 300-летнего прогнозного этапа, имитирующего восстановление естественных условий после предполагаемой ликвидации скважины и канала перетекания (2017–2315 гг.).

В модели реализован нестационарный режим трехмерного потока подземных вод, учтены процессы инфильтрационного питания и испарения подземных вод. Созданная модельная водонапорная система характеризуется общими для разных горизонтов показателями процесса фильтрации: в плане направление потока подземных вод северное, к региональным дренам под уклоном 0.002–0.003; вниз по разрезу до глубин 200–250 м происходит снижение напоров (градиент напоров 0.1), способствующее нисходящему движению подземных вод.

Перекрывающая эксплуатационный горизонт слабопроницаемая толща (относительный водоупор) представлена в модели в виде однородного в плане, слоистого и анизотропного в разрезе пласта, мощностью 90 м. В разрезе водоупора выделено три литологических разности: пески, песчаники, глины.

Моделирование выполнено по схеме конвективно-дисперсионного переноса с учетом молекулярной диффузии геохимически нейтрального компонента, без учета радиоактивного распада. Основной показатель для сопоставления модельных и фактических данных о миграции компонента-индикатора — высота (абсолютная отметка) положения границы интервала повышенного гамма-излучения над кровлей эксплуатационного горизонта, определенная по данным гамма-каротажа. Было принято,

что в модели эта граница соответствует минимальной относительной концентрации  $C/C_0$  мигранта  $1 \cdot 10^{-4}$ , где  $C$  — текущая концентрация компонента, равная в начальный момент времени 0,  $C_0$  — концентрация компонента в отходах, равная 1.

Решение уравнений геофильтрации и геомиграции выполнено численным сеточным блочно-центрированным балансовым методом конечных разностей. Для расчетов применялись программы MODFLOW и MT3DMS<sup>1</sup>, входящие в состав программного комплекса Processing Modflow (version 8.0.43, Simcore Software) [15].

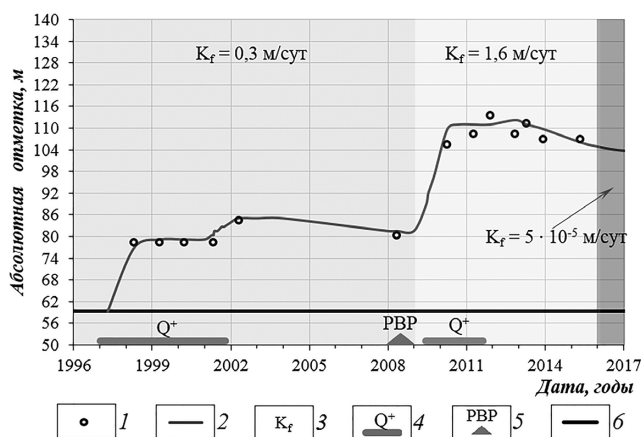
#### *Схематизация и результаты оценки параметров среды в канале перетекания*

Канал перетекания моделировался как интервал повышенной проницаемости в водоупоре над фильтром скважины Н-10, высотой в разрезе 70 м и площадью поперечного сечения 0.04 м<sup>2</sup> (20×20 см), которая близка к площади сечения эксплуатационной колонны скважины диаметром ~22 см (219 мм). Активная пористость среды в канале не отличалась от пористости окружающих пород, т.е. изменялась по высоте канала от 0.2 до 0.3, и во времени оставалась постоянной. Указанные высокие значения активной пористости, близкие к общей пористости пород, традиционно применяются в практике долговременных прогнозов миграции компонентов отходов на ПГЗ ЖРО, что обусловлено длительностью процессов перераспределения компонентов отходов в сложнопостроенном реальном трещинно-пористом пространстве водоносных горизонтов и постепенным заполнением отходами практически всей их полезной емкости [10, 14]. Горизонтальный коэффициент фильтрации ( $k_{xy}$ ) в канале соответствовал среднему коэффициенту фильтрации глин на участке  $5 \cdot 10^{-5}$  м/сут.

Многовариантное моделирование истории эксплуатации скважины Н-10 и развития процесса заколонного перетекания позволило установить, что основными параметрами, определяющими пространственно-временные закономерности изменения напора и концентрации веществ в канале, могут являться вертикальный коэффициент фильтрации ( $k_z$ ) и продольная дисперсивность ( $d_l$ ) среды в канале. Результаты модельных экспериментов позволили оценить возможные значения этих параметров и диапазон их изменения в пространстве и времени.

Первоначально в период начала разрушения цементного камня и образования канала перетекания (1997–2009 гг.)  $k_z$  среды в канале составлял 0.3 м/сут. В дальнейшем, после проведения ремонт-

<sup>1</sup> <http://www.simcore.com>.



**Рис. 3.** Изменение высоты миграции компонентов отходов по стволу скважины Н-10 во времени по данным мониторинга и моделирования. 1 – данные гамма-каротажа; 2 – данные моделирования; 3 – коэффициент фильтрации среды в канале перетекания; 4 – обобщенный период прерывистого нагнетания ЖРО; 5 – период ремонтно-восстановительных работ; 6 – положение кровли эксплуатируемого горизонта.

но-восстановительных работ, когда нагнетание отходов в скважину было возобновлено (в 2009 г.), проницаемость канала увеличилась примерно в 5 раз:  $k_z$  стал равным 1.6 м/сут. Расчетное увеличение проницаемости среды в канале перетекания подтверждает влияние техногенных воздействий на фильтрационные свойства материала в затрубном пространстве скважины. Полученное сочетание значений коэффициента фильтрации (0.3-1.6 м/сут) и пористости (0.2-0.3) среды в канале перетекания по классификации, предложенной Н. А. Плотниковым и дополненной Е. Е. Керксом, характерно для пород со средней и низкой проницаемостью [8]. В постэксплуатационный период, после ликвидации канала перетекания и прекращения нагнетания,  $k_z$  для имитации худшего варианта условий перетекания принимался постоянным и равным среднему коэффициенту фильтрации глин на участке  $5 \cdot 10^{-5}$  м/сут.

Коэффициент фильтрации среды в канале в начале развития процесса перетекания был практически равен коэффициенту фильтрации эксплуатационного горизонта 0.4 м/сут.

При оценке продольной дисперсивности среды ( $d_L$ ) в канале перетекания учитывалось, что она может существенно отличаться от дисперсивности окружающих пород и быть переменной как по его высоте, так и во времени, потому что значения дисперсивности зависят от геометрического размера неоднородностей пород и пустотного пространства, а также скорости фильтрации. Результаты моделирования показали, что значения  $d_L$  в канале могут максимально (в 5 раз) превышать

$d_L$  в наиболее проницаемых прослоях (песках) геологического разреза и достигать 2-5 м, так же как в трещиноватых породах, и что значение  $d_L$  может уменьшаться по высоте канала перетекания.

### Закономерности и последствия заколонного перетекания по данным моделирования

Созданная модель адекватно описывает динамику границы области миграции компонентов отходов в вертикальном направлении по затрубному пространству нагнетательной скважины Н-10, учитывая хорошее совпадение ее фактического и расчетного положения во времени (рис. 3). Максимальная дальность вертикальной миграции компонентов отходов с относительной концентрацией  $10^{-4}$  по данным моделирования и мониторинга наблюдалась через 15 лет после начала процесса перетекания компонентов отходов и составляла 56 м от кровли эксплуатационного горизонта. Исходя из таких значений, расстояния и времени, средняя действительная скорость перетекания вверх по каналу составляла 4 м/год, или 0.01 м/сут. Протяженность области наибольших относительных концентраций (0.5-1) нейтрального компонента, соответствующая зоне конвективного переноса (поршневого вытеснения) подземных вод, на этапе эксплуатации скважины Н-10 в канале перетекания была в 6 раз меньше длины канала и не превышала 12 м от кровли эксплуатационного горизонта. Длина области относительных концентраций нейтрального компонента в канале, соответствующая зоне дисперсии компонентов отходов (менее 0.5), была в 4 раза больше длины зоны поршневого вытеснения и составляла 44 м.

На основе данных моделирования с использованием аналитических формул выполнена оценка показателей перетекания (расхода, скорости, объема перетока) в наихудших условиях. Согласно расчетам, при наибольшем коэффициенте фильтрации 1.6 м/сут, градиенте напора 0.16 и площади поперечного сечения канала  $0.04 \text{ м}^2$  скорость фильтрации составляла 0.3 м/сут, расход перетекания  $0.01 \text{ м}^3/\text{сут}$  ( $4 \text{ м}^3/\text{год}$ ). При этом в эксплуатационный горизонт через Н-10 захоранивалось  $100-300 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Общий объем жидкости с компонентами ЖРО, который мог бы поступить в вышезалегающие горизонты, по оценкам, составил  $\sim 20 \text{ м}^3$ . Данный объем перетекания значительно меньше общего объема ЖРО, удаленного в недра через скважину Н-10 за одни сутки, а также меньше расхода перетока в нефтедобывающих скважинах, который может достигать сотен кубометров в сутки [7].

Моделирование подтвердило установленную по данным мониторинга взаимосвязь заколонного перетекания компонентов ЖРО и режима эксплуатации скважины. В динамических условиях,

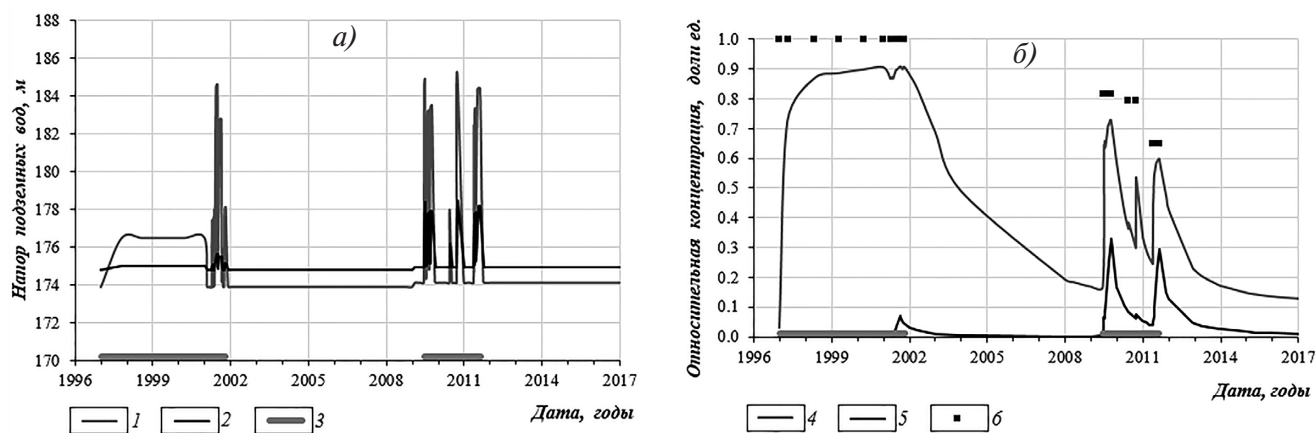
в период нагнетания отходов, в канале перетекания существенно повышаются напоры, градиент напора, скорость фильтрации жидкости (рис. 4а). Соотношение напоров разных водоносных слоев изменяется на противоположное относительно природного, и начинается восходящее течение жидкостей. В канале повышается концентрация компонентов отходов и увеличивается дальность их миграции вверх по стволу скважины (см. рис. 3, 4б). В статических условиях, после прекращения нагнетания, происходит достаточно быстрое восстановление природных напоров, снижение концентрации и высоты миграции компонентов ЖРО. Причиной снижения концентрации рассмотренного нейтрального вещества в канале в статических условиях, по данным моделирования, являются в основном вытеснение вещества природными конвективными потоками подземных вод (латеральным с юга на север и профильным нисходящим), а также развитие процессов дисперсии. В реальных природно-техногенных условиях снижению концентрации компонентов отходов в канале, в окружающих его породах и восстановлению природных гидрогеохимических условий также способствуют физико-химические процессы (сорбция, радиоактивный распад и др.).

Таким образом, возникновение, развитие и прекращение процесса восходящего перетекания жидкостей имеет не случайный, а закономерный характер: пространственно-временные изменения основных показателей перетекания обусловлены главным образом переменными значениями расхода и давления нагнетания отходов, а также изменчивостью фильтрационных и миграционных параметров среды в канале перетекания.

Полученный вывод указывает, во-первых, на то, что заколонное перетекание для лучшего представления физической сущности процесса и решения практических задач можно описывать линейным законом фильтрации (законом Дарси), а во-вторых, что существует возможность эффективного управления процессом перетекания путем корректировки режима эксплуатации скважины и изменения фильтрационных свойств среды за ее колонной.

Согласно результатам моделирования, расход перетекающей жидкости перераспределяется в разрезе между слоями в соответствии с их проводимостью и в зависимости от размера градиента напора. Наибольший расход поступает в слои с максимальной проводимостью, которые расположены в области наибольших значений градиента напора. В итоге наибольшая площадь и радиус области распространения компонентов отходов в плане наблюдаются в песчаных слоях, залегающих в пределах слабопроницаемой толщи над кровлей эксплуатационного горизонта (рис. 5а).

С целью оценки влияния фильтрационной неоднородности покрывающего водоупора на скорость и характер заколонного движения отходов, процесс перетекания по стволу Н-10 был реализован на модели с однородным анизотропным водоупором. Значение горизонтального коэффициента фильтрации ( $k_{xy}$ ) всей толщи составляло  $10^{-4}$  м/сут, в вертикальном направлении ( $k_z$ ) – в 10 раз меньше. Параметры и характеристики канала перетекания были такие же, как в первоначальном базовом варианте. Сравнение полученных двух вариантов перетекания показало, что скорость движения компонентов ЖРО вверх по каналу перетекания немного (в 1.3 раза) ниже при слоистом



**Рис. 4.** Графики колебания напора подземных вод (а) и относительной концентрации нейтрального компонента (б) в канале перетекания во времени по данным моделирования. 1-2 – напор на высоте над кровлей горизонта: 1 – 1 м, 2 – 18 м; 3 – обобщенный период прерывистого нагнетания ЖРО в скважину Н-10; 4-5 – концентрация вещества на высоте над кровлей горизонта: 4 – 1 м, 5 – 18 м; 6 – концентрация вещества в ЖРО.

строении водоупора, также меньше высота их миграции и максимальные концентрации (рис. 5б). Полученный результат означает, что фильтрационная неоднородность водоупора препятствует восходящему движению отходов к поверхности земли и способствует их локализации в недрах, что необходимо учитывать при детальных исследованиях и оценках безопасности ПГЗ ЖРО.

Результаты анализа данных мониторинга и моделирования позволили оценить размеры области распространения компонентов отходов, которая образовалась в недрах к настоящему времени в результате перетекания компонентов отходов по стволу скважины Н-10. Ореол рассеяния компонентов ЖРО расположен в непосредственной близости от скважины: в плане максимально вытянут на 50-60 м на север по направлению естественного потока подземных вод, в разрезе занимает 50-60-метровый интервал над кровлей эксплуатационного горизонта, т.е. на глубине более 90 м от поверхности земли. Скорость распространения компонентов ЖРО от скважины в плане в отдельных слоях перекрывающего водоупора за 20-летний период существования канала была близка к средней скорости движения вверх по каналу и составляла 3 м/год, что в 6 раз больше скорости естественного потока подземных вод в песчаных прослоях перекрывающего водоупора, равной 0.5 м/год.

В постэксплуатационный период, по результатам прогнозного моделирования, смещение ореола рассеяния компонентов отходов на север будет продолжаться. Через 300 лет после ликвидации скважины и канала перетекания наибольшая дальность миграции компонентов ЖРО от скважины в плане составит 200 м. Высота области распространения компонентов отходов в разрезе снизится и будет составлять 40 м над кровлей эксплуатационного горизонта. Содержания компонентов отходов в подземных водах также уменьшатся и не превысят  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  от содержания в ЖРО. Непосредственно в канале перетекания концентрация компонентов отходов будет выше примерно на порядок.

Полученные оценки подтверждают, что последствия затрубных перетоков подземных вод и отходов будут проявляться в непосредственной близости от стволов скважин в пределах горного отвода недр в течение времени, пока радиоактивные компоненты ЖРО будут представлять экологическую опасность. При этом область их локализации в разрезе будет существенно меньше, чем в плане.

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований позволили сделать ряд выводов, которые могут быть полезны для формирования объективных пред-

ставлений о последствиях процесса заколонного перетекания компонентов отходов на участках глубинного захоронения ЖРО, а также выбора или разработки оптимального способа его предотвращения.

Заколонные перетоки подземных вод и компонентов отходов на участках захоронения отходов и стоков имеют восходящий характер и происходят преимущественно в периоды нагнетания отходов. В перерывах нагнетания переток существенно замедляется, прекращается и может стать нисходящим. Фактор развития этого процесса – наличие градиента напора жидкости.

Причинами ухудшения герметичности скважин и образования каналов перетекания являются физические воздействия на скважину и физико-химические процессы, обусловленные главным образом техногенными факторами. Ликвидация канала перетекания выполняется тампонажными материалами, при твердении которого образуется камень, по водопроницаемости аналогичный горным породам со средней и низкой проницаемостью. Фильтрационно-емкостные свойства этого материала и значения миграционных параметров могут существенно меняться в пространстве и времени, что должно учитываться при геомиграционных расчетах.

Последствия заколонного перетекания подземных вод и компонентов отходов по стволам скважин имеют локальные пространственно-временные значения, которые ограничены буферным горизонтом или перекрывающим эксплуатационный горизонт флюидоупором в пределах утвержденного горного отвода недр.

Способы предотвращения образования каналов и развития в них заколонных перетоков отходов должны быть направлены на совершенствование тампонажных цементов и методов цементирования скважин, усиление конструкции скважин над их фильтром, создание локальных преентивных цементационных завес, минимизацию техногенного воздействия на скважину на всех этапах ее «жизненного цикла». Нагнетательные скважины требуют применения повышенных мер безопасности, как скважины, подверженные наибольшему риску развития перетоков.

Научно-практические исследования эффекта заколонного перетекания радиоактивных отходов могут и должны быть продолжены, а полученные результаты и сделанные выводы переосмыслены, расширены и уточнены, потому что такие реальные природно-техногенные системы, как ПГЗ ЖРО, существенно сложнее любых теоретических представлений и расчетных моделей и не остаются неизменными во времени.



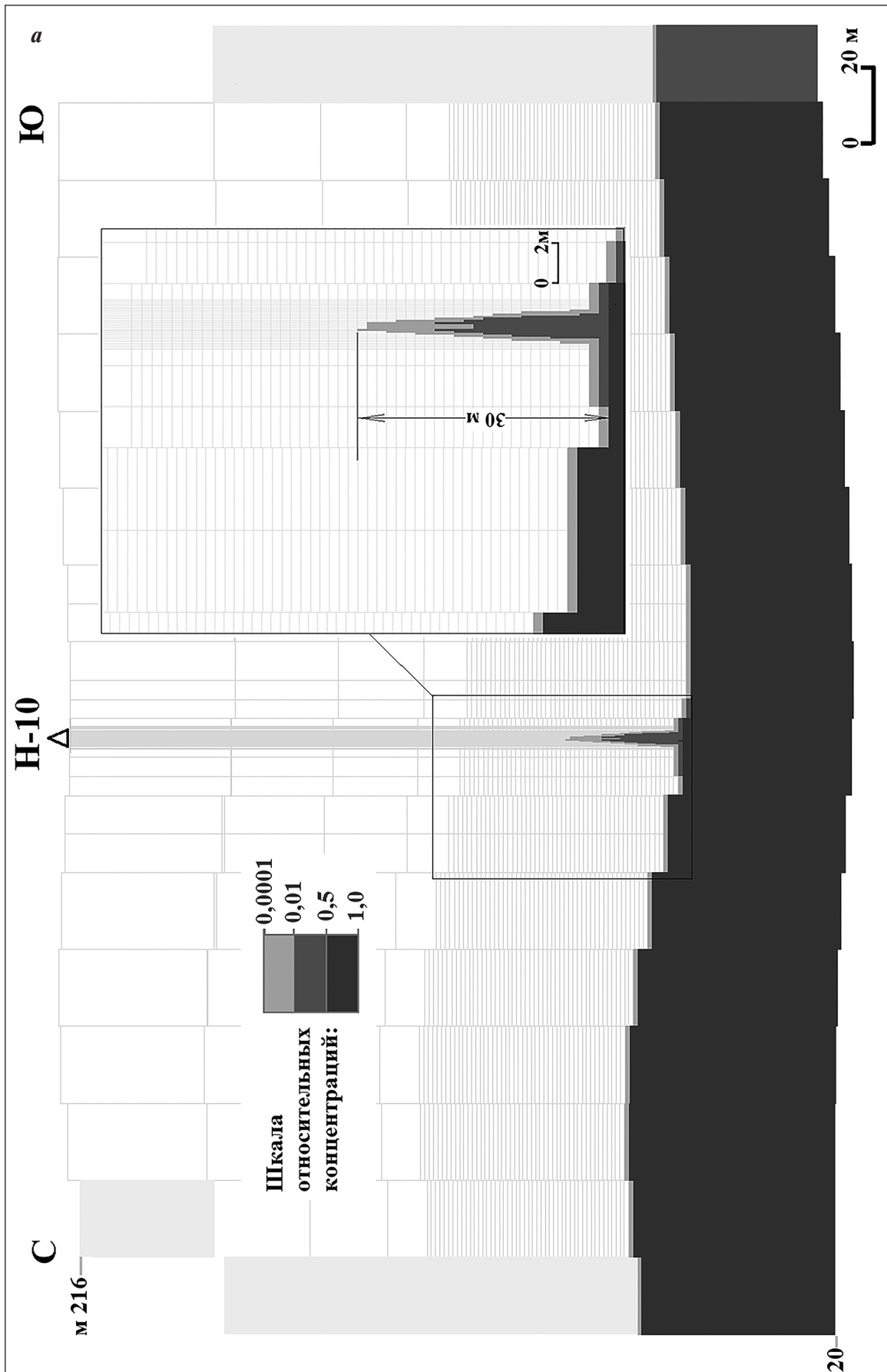
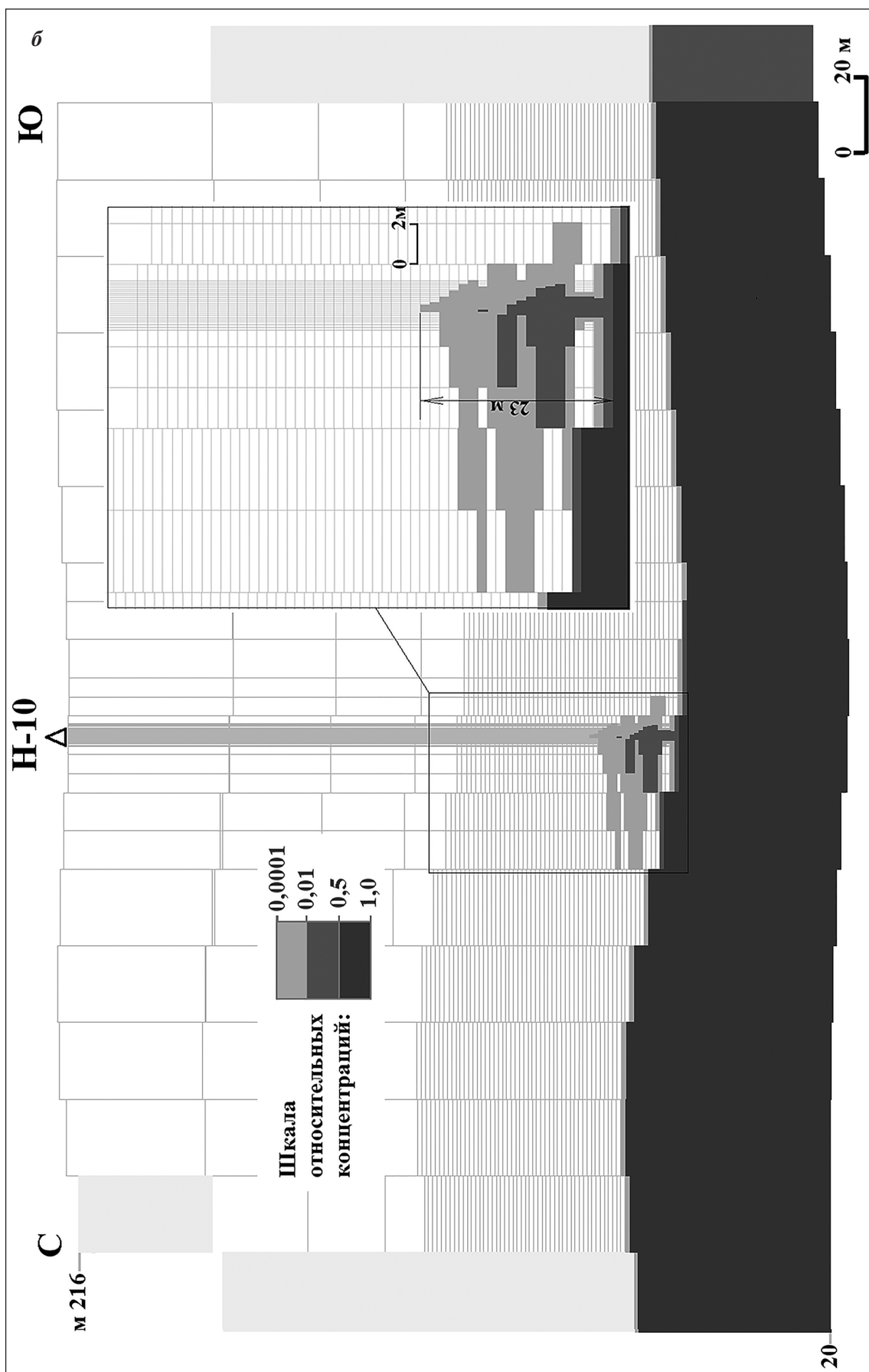


Рис. 5. Область распространения компонентов отходов по состоянию на 2008 год (через 10 лет после начала заколонного перетекания) по данным моделирования в разрезе: *a* – однородного водоупора, *б* – неоднородного слоистого водоупора.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агадулин И.И., Игнатьев В.Н., Сухоруков Р.Ю. Экологические аспекты негерметичности заколонного пространства в скважинах различного назначения // Нефтегазовое дело: электронный журнал. 2011. № 4. С. 82-90. <http://www.ogbus.ru>.
2. Бозырев Ю.С. Методы предотвращения смятия обсадных колонн глубоких скважин в сложных горно-геологических условиях: дис. ... докт. техн. наук. М., 2006. 323 с.
3. Верещагин П.М. Разработка коррозионнотстойких тампонажных материалов для надежного обеспечения экологической безопасности при сооружении и ликвидации скважин полигонов захоронения жидких радиоактивных отходов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 204 с.
4. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П., Лукьянчикова Л.Г. Подземное захоронение промышленных сточных вод. М.: Недра, 1994. 281 с.
5. Дахнов В.Н., Дьяконов Д.И. Термические исследования скважин. М.-Л.: Гостоптехиздат, 1952. 251 с.
6. Долгих Л.Н. Крепление, испытание и освоение нефтяных и газовых скважин: электр. учебное пособие. Пермь: ПГТУ, 2007. 189 с. [http://pstu.ru/files/file/gnf/kreplenie\\_ispytanie\\_i\\_osvoenie\\_skvazhin.pdf](http://pstu.ru/files/file/gnf/kreplenie_ispytanie_i_osvoenie_skvazhin.pdf)
7. Ишбаев Г.Г., Бикиняев Р.А. Технология РИР — отсечение межпластовых перетоков по стволу скважин // Бурение и нефть. 2010. № 12. С. 22-25.
8. Керкис Е.Е. Методы изучения фильтрационных свойств горных пород. Л.: Недра, 1975. 231 с.
9. Куранов П.Н. Определение источников загрязнения подземных и поверхностных вод в районе расположения полигонов сброса попутных и сточных вод // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2013.- № 5. С. 118-130.
10. Моделирование последствий эксплуатации полигона глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов Сибирского химического комбината на среднесрочный и сверхдолгосрочный периоды / М. Л. Глинский, С. П. Поздняков, Л. Г. Черткова и др. // Радиохимия. 2014. Т. 56, № 6. С. 554-560.
11. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ: учеб. пособие. Красноярск: СФУ, 2015. 396 с.
12. Пискунов А.И., Леушева Е.Л. Анализ причин появления заколонных перетоков // Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин Томск: Томский политехнический университет, 2014. С. 288-296.
13. Пермьяков И.Г. Хайрединов Н.Ш. Шевкунов Е.Н. Нефтегазопромысловая геология и геофизика: уч. пос. для вузов. М.: Недра, 1986. 269 с.
14. Рыбальченко А.И., Пименов М.К., Костин П.П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. 256 с.
15. Chiang W.H. and Kinzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. First Edition. Springer Berlin Heidelberg New York. 2001, 346 p.

## REFERENCES

1. Agadullin, I.I., Ignatiev, V.N., Sukhorukov, R.Yu. *Ekologicheskie aspekty negermetichnosti zakolonnogo prostanstva v skvazhinakh razlichnogo naznacheniya* [Environmental aspects of the leakage annulus in the wells for various purposes]. *Neftgazovoe delo*, 2011, no. 4, pp. 82-90. Available at: <http://www.ogbus.ru> (in Russian).
2. Bozyrev, Yu.S. *Metody predotvrashcheniya smyatiya obsadnykh kolonn glubokikh skvazhin v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh*. [Prevention method for crumpling of casing strings in deep wells at difficult mining and geological conditions]. Diss. dokt. tekhn. Nauk, Moscow, 2006. 323 p. (in Russian)
3. Vereshchagin, P.M. *Razrabotka korrozionnostoikikh tamponazhnykh materialov dlya nadezhnogo obespecheniya ekologicheskoi bezopasnosti pri sooruzhenii i likvidatsii skvazhin poligonov zakhoroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov*. [Development of corrosion-resistant oil-well materials for support environmental safety in the construction and close of wells deep disposal facilities for liquid radioactive waste]. Diss. cand. tekhn. nauk. Moscow, MUCTR Publ., 2010, 204 p. (in Russian)
4. Gol'dberg, V.M., Skvortsov, N.P., Luk'yanchikova, L.G. *Podzemnoe zakhoronenie promyshlennykh stochnykh vod* [Deep disposal of industrial wastewater]. Moscow, Nedra Publ., 1994, 281 p. (in Russian).
5. Dakhnov, V.N., D'yakonov, D.I. *Termicheskie issledovaniya skvazhin* [Thermal studies of wells]. Moscow, Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1952, 251 p. (in Russian).
6. Dolgikh, L.N. *Kreplenie, ispytanie i osvoenie neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Fastening, testing and development of oil and gas wells]. Perm, PNRPU Publ., 2007, 189 p. (in Russian).
7. Ishbaev, G.G., Bikinyaev, R.A. *Tekhnologiya RIR — otsechenie mezhplastovykh peretokov po stvolu skvazhin* [Technology repair of insulation work — pruning interstratal power exchange along the wellbore]. *Burenie i nef't*, 2010, no. 12, pp. 22-25. (in Russian).
8. Kerkis, E.E. *Metody izucheniya filtratsionnykh svoistv gornykh porod* [Methods of studying the filtration properties of rocks]. Leningrad, Nedra Publ., 1975, 231 p. (in Russian).
9. Kuranov, P.N. *Opredelenie istochnikov zagryazneniya podzemnykh i poverkhnostnykh vod v raione raspolozheniya poligonov sbrosa poputnykh i stochnykh vod* [Deter-

- mination of sources of groundwater and surface water pollution in the area of associated and wastewater discharge landfills]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychainykh situatsii*, 2013, no. 5, pp. 118-130. (in Russian).
10. Glinskii, M.L., Pozdniakov, S.P., Chertkova, L.G. et al. *Modelirovanie posledstviy ekspluatatsii poligona glubinnogo zakhoroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov sibirskogo khimicheskogo kombinata na srednesrochnyi i sverkhdolgosrochnyi periody* [Modeling of the consequences of operation of the deep burial site of liquid radioactive waste of the Siberian chemical plant for the medium and long-term periods]. *Radiokhimiya*, 2014, vol. 56, no. 6. pp. 554-560. (in Russian).
  11. Neskornomnykh, V.V. *Razrushenie gornykh porod pri provedenii geologorazvedochnykh rabot* [Destruction of rocks during geological exploration]. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 2015, 396 p. (in Russian).
  12. Piskunov, A.I., Leusheva, E.L. *Analiz prichin proyavleniya zakolonnnykh peretokov* [Analysis of the causes of the annular flow]. *Problemy nauchno-tekhnicheskogo progressa v burenii skvazhin: sbornik dokladov vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem posvyashchennoi 60-letiyu kafedry bureniya skvazhin* [Problems of scientific and technical progress in well drilling: Proc. of all-Russ. sci. and techn. conference]. Tomsk, TPU Publ., 2014, pp. 288-296. (in Russian).
  13. Permiakov, I.G., Khairedinov, N.Sh., Shevkunov, E.N. *Neftegazopromyslovaya geologiya i geofizika* [Oil and gas geology and geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1986, 269 p. (in Russian).
  14. Rybal'chenko, A.I., Pimenov, M.K., Kostin, P.P. et al. *Glubinnoe zakhoronenie zhidkikh radioaktivnykh otkhodov* [Deep disposal of liquid radioactive waste]. Москва, IzdAT Publ., 1994, 256 p. (in Russian).
  15. Chiang, W. H., Kinzelbach, W. *3D-Groundwater Modeling with PMWIN*. First Edition. New York, Springer Berlin Heidelberg, 2001, 346 p.

## CONDITIONS, CONSEQUENCES AND PREVENTION WAYS OF BEHIND-THE-CASING FLOW IN DEEP WELL INJECTION DISPOSAL OF LIQUID WASTE SITES

A. V. Ponizov<sup>1,\*</sup>, P. M. Vereshchagin<sup>1</sup>, N. V. Chulkov<sup>1</sup>, M. K. Sharaputa<sup>2,\*\*</sup>, E. A. Baidariko<sup>3,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, ul. Malaya Krtasnosel'skaya 2/8, bld. 5, Moscow, 107140 Russia

\*E-mail: ponizov@secnrs.ru

<sup>2</sup>JSC VNIPIpromtekhologii, Kashirskoe sh., 33, Moscow, 115409 Russia

\*\*E-mail: sharaputa.M.K@vnipt.ru

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, 1, Moscow, 119991 Russia

\*\*\*E-mail: hydrogeo@mail.ru

The main detection methods, signs, geotechnical conditions, factors and potential consequences of liquid radioactive waste (LRW) behind-the-casing flow are described in the paper. Based on the modeling results for the real LRW components behind-the-casing flow, the mechanism of behind-the-casing flows evolution in the intervals of wells with increased permeability of cement stone are presented. The concentration of LRW components in these intervals changes significantly in time and depends not only on their current concentration in the waste and the permeability of the rock, but also on the pressure gradient, the direction and absolute value of which are determined by the well operation mode and natural hydrogeological conditions. It is noted that behind-the-casing flows of groundwater and LRW components are formed primarily in injection wells, above its filter and top of aquifer used for LRW disposal (operational aquifer). The behind-the-casing flows lead to technogenic changes in the geological environment, which are local in space and time, and reduce the safety of such facilities as deep-level disposal sites for LRW (DDF LRW).

The vertical channel of increased permeability around injection wells and behind-the-casing flows may be prevented by improving the design and construction materials of wells, adjustment of the LRW disposal mode and other methods, including the use of new sealing materials and clarifying technical solutions.

**Keywords:** *deep disposal of liquid radioactive waste, deep disposal facility for liquid radioactive waste, behind-the-casing flow, injection wells, cement stone, geomigration modeling.*

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019256-67>