

УДК 556.639; 556.38

Куваев А.А., Коннов Д.В., Святовец С.В.,  
 Спешиллов С.Л. (ФГБУ «Гидроспецгеология»),  
 Афанасьев Ф.И., Шаяхметова Л.Р.  
 (АО «Башкирская содовая компания»)

### ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЗАКАЧКИ СТОЧНЫХ ВОД СОДОВОГО ПРОИЗВОДСТВА В ГЛУБОКИЕ ПЛА- СТОВЫЕ СИСТЕМЫ ПАЛЕОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ЗОНЕ Г. СТЕРЛИТАМАК

*С использованием численного моделирования рассматривается возможность закачки сточных вод содового производства в глубокие пластовые системы палеозойских отложений в промышленной зоне г. Стерлитамак. **Ключевые слова:** геофильтрационное и геомиграционное моделирование, плотностная конвекция, глубинное захоронение жидких протоктов.*

Kuvaev A.A., Konnov D.V., Svyatovets S.V., Speshilov S.L.  
 (Hydrospecialgeology), Afanasev F.I., Shayakhmetova L.R.  
 (Bashkir soda company)

### ASSESSMENT OF POSSIBILITY FOR DISPOSAL OF SODIC PRODUCTION LIQUID WASTES INTO DEEP PALEOZOIC AQUIFER SYSTEM IN PROXIMITY OF INDUSTRIAL AREA OF STERLITAMAK CITY

*Numerical modeling approach for injection of sodic production liquid wastes into deep Paleozoic aquifer system in proximity of industrial area of Sterlitamak city is taken under consideration. **Keywords:** hydrodynamic and solute transport modeling, density convection, deep disposal of liquid wastes.*

#### Введение

Обезвреживание жидких промышленных отходов предприятий различных отраслей Российской Федерации является на сегодняшний день важнейшей экологической проблемой.

Одним из экономически наиболее эффективных способов обращения с жидкими токсичными отходами и промышленными стоками является захоронение (закачка) их в недра на специальных полигонах. Подземная закачка попутных и сточных вод была начата на нефтяных месторождениях в США и СССР в начале XX в. Подземные воды (обычно воды высокой минерализации) закачивали в непродуктивные водоносные горизонты и в заводненные нефтесодержащие скважины, т.к. сбрасывать рассолы напрямую в поверхностные водотоки и водоемы было невозможно из-за наносимого невосполнимого экологического ущерба последним.

Хранение же огромных объемов подтоварных или попутных вод в прудах-накопителях не решало пробле-

му, а только отдалало решение при возрастающих потенциальных затратах и развитии производства.

В настоящее время объем закачиваемых обратно в нефтеносные пласты попутных вод достигает 90 % и около 7 % в непродуктивные водоносные горизонты.

В середине XX в. предприятия различных отраслей промышленности в разных странах приняли на вооружение опыт нефтедобывающих организаций для удаления больших объемов жидких отходов.

Во всем мире загрязнение водоемов, подземных вод, почв и грунтов сточными водами в настоящее время превратилось почти в катастрофу.

В этой ситуации подземное захоронение промышленных отходов и закачка сточных вод в глубокозалегающие горизонты, воды которых из-за высокой минерализации или токсичности не находят практического применения, является способом обращения, позволяющим резко снизить загрязнение окружающей среды в промышленных районах.

За рубежом подземное захоронение жидких промышленных отходов и закачка сточных вод получило наибольшее распространение в США. В настоящее время там, кроме нескольких десятков тысяч нагнетательных скважин нефтяной промышленности, действует не менее семисот полигонов захоронения на предприятиях химической, нефтехимической, фармацевтической, газовой и металлургической промышленности.

Подземное захоронение жидких промышленных отходов широко распространено в Германии, Великобритании, Франции, Канаде, Японии.

В нашей стране эта технология интенсивно развивалась в XX в. и продолжает развиваться в последние 18 лет.

Например, только на Уренгойском газоконденсатном месторождении действует 16 полигонов по захоронению подтоварных и сточных вод. В 2008 г. введен в эксплуатацию полигон захоронения промышленных стоков на Калининской АЭС. Функционируют полигоны подземного захоронения в Нижегородской и Тамбовской областях, в г. Волгоград.

Всего на территории РФ действует более 20 полигонов глубинного захоронения промышленных отходов и сточных вод, не считая десятков объектов нефтегазовой отрасли.

Подземное захоронение жидких отходов и закачки сточных вод в РФ регламентируются федеральными законами: «О недрах» от 21.02.1992 г. № 2395–1, «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ, «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ, «Водным кодексом» от 03.06.2006 г. № 74-ФЗ.

Другие способы обращения с жидкими химическими отходами, представляющими серьезную опасность для окружающей среды, не обеспечивают необходимую защиту природных объектов и населения.

Повсеместно применяется сброс производственных сточных вод в поверхностные водоемы и водотоки, вследствие чего происходит загрязнение подстилающих и вмещающих горных пород и пресных подземных вод. В некоторых случаях допускают сброс жидких отходов на рельеф. Такой подход во многом объясняется отсутствием малозатратных и экологически приемлемых способов обезвреживания жидких стоков.

Известными способами обращения с жидкими промышленными отходами являются выпаривание, возврат в производство и создание экранированных накопителей. Метод выпаривания требует складирования твердых остатков в экранированных накопителях, где отходы в виде солей размываются атмосферными осадками и фильтруются в пресные водоносные горизонты, загрязняя их.

Создание гидроизолированных накопителей для хранения большого объема жидких отходов очень дорого, технически сложно, при этом «зеркало» накопителя будет являться источником атмосферного загрязнения.

*Таким образом, метод подземного захоронения жидких отходов и закачки сточных вод является практически единственным способом их удаления.* Только он позволяет удалить из сферы человеческой жизнедеятельности и надежно их изолировать.

При подземном захоронении сточных вод целевые и буферные водоносные горизонты в пределах обособленных горных отводов не должны содержать вод, пригодных для хозяйственно-питьевого водоснабжения, а также промышленных залежей нефти, газа и других полезных ископаемых, если захоронение может оказать негативное влияние на условия их добычи.

Возможность подземного захоронения отходов в горизонты, содержащие минеральные, теплоэнергетические и промышленные воды, должна быть обоснована с социально-экологических и экономических позиций.

Рассмотренный в настоящей статье в качестве целевого визейско-башкирский водоносный комплекс используется для захоронения промышленных стоков (включая высокотоксичные) на двух полигонах в пределах Республики Башкортостан и на нескольких объектах в других регионах Российской Федерации. Он обладает доказанными высокими поглощающими свойствами и хорошо изолирован от сферы жизнедеятельности человека.

**Актуальность закачки сточных вод содового производства в глубокие пластовые системы для г. Стерлитамак**

Стерлитамак является второй (неофициальной) столицей в республике Башкортостан, а также ее важнейшим промышленным центром. В промышленной зоне города расположены крупные предприятия химической промышленности, построенные в 1940–1960-х годах, такие как Акционерное общество «Башкирская содовая компания», предприятия группы компании ТАУ, ФКП «Авангард» и др.

Акционерное общество «Башкирская содовая компания» образовалось в 2013 г. при слиянии двух крупных предприятий ОАО «Каустик» и ОАО «Сода».

На производстве «Каустик» выпускают каустическую соду, ПВХ смолу, кабельный пластикат, белизну. На производстве «Сода» — кальцинированную соду, пищевую соду (знаменитую оранжевую пачку, которая имеется в каждом доме).

Так как содовое производство методом Сольве является одним из водоемких, а строительство предприятий во времена СССР велось с учетом сырьевой базы и близкого расположения водных ресурсов, то предприятия были построены в районе р. Белая в окружении месторождений известняка и соли. Из р. Белая вода для производства соды насосами забирается в производство, далее часть воды направляется на охлаждение теплообменного оборудования, после которого в виде отработанной речной воды без загрязнений возвращается в водный объект, а часть направляется в производство соды и выходит после него в качестве сточной воды — дистиллерной жидкости (далее ДЖ). На 1 т соды образуется 9 т ДЖ [9]. По своему составу ДЖ представляет смесь речной воды и известкового молока, содержащую взвеси, соли хлоридов, кальция в высокой концентрации. Вся ДЖ направляется в шламонакопитель «Белое море», состоящий из 9 отсеков и расположенный возле р. Белая. В отсеках ДЖ отстаивается, часть дистиллерной жидкости проходит процесс карбонизации и направляется обратно в производство, часть — направляется на объект «Кама-2» для закачки ее через нагнетательные скважины в глубокозалегавшие горизонты. А часть ДЖ после разбавления с соблюдением установленных нормативов допустимых сбросов, с учетом разбавления рекой, сбрасывается в р. Белая. Такая технология удаления ДЖ была разработана в 1970-х годах. Но поскольку производство соды увеличивается, то соответственно объемы образования ДЖ возрастают, а сбрасывать лишние объемы ДЖ нет возможности. Так как сброс ДЖ в р. Белая зависит от ее гидрологических характеристик, причинами, исключающими возможность сброса большого объема сточных вод (разбавленной ДЖ), является маловодность р. Белая. В последние годы наблюдаются малоснежные зимы, что отражается на паводковых явлениях и подземном питании р. Белая в районе г. Стерлитамак. Все это влечет за собой проблему удаления ДЖ из шламонакопителя (ее сброса в реку). Актуальность использования подземной закачки сточных вод для Стерлитамака очень высока. Это снижает антропогенное воздействие ДЖ на природную среду.

Как говорилось выше, на АО «Башкирская содовая компания» (АО «БСК») имеется объект «Кама-2», который был пущен в эксплуатацию в ноябре 1976 г. На объекте через две нагнетательные скважины проводится закачка ДЖ в подземные горизонты с токсичными пластовыми водами. На основании опыта продолжительной эксплуатации объекта «Кама-2» можно сделать вывод, что данный метод удаления ДЖ является наиболее экологически эффективным. Этот метод исключает попадание ДЖ в природные объекты, вызывая их засоление за счет высокого содержания солей [7].

В дальнейшем применение закачки сточных вод в подземные горизонты может рассматриваться как наилучшая доступная технология по удалению сточных вод [5].

### Геолого-гидрогеологические условия г. Стерлитамак и прилегающей территории

Ясные представления об условиях формирования и гидродинамической структуре регионального геофильтрационного потока в пласте-коллекторе необходимы для получения достоверного прогноза миграции закачиваемой дистиллерной жидкости.

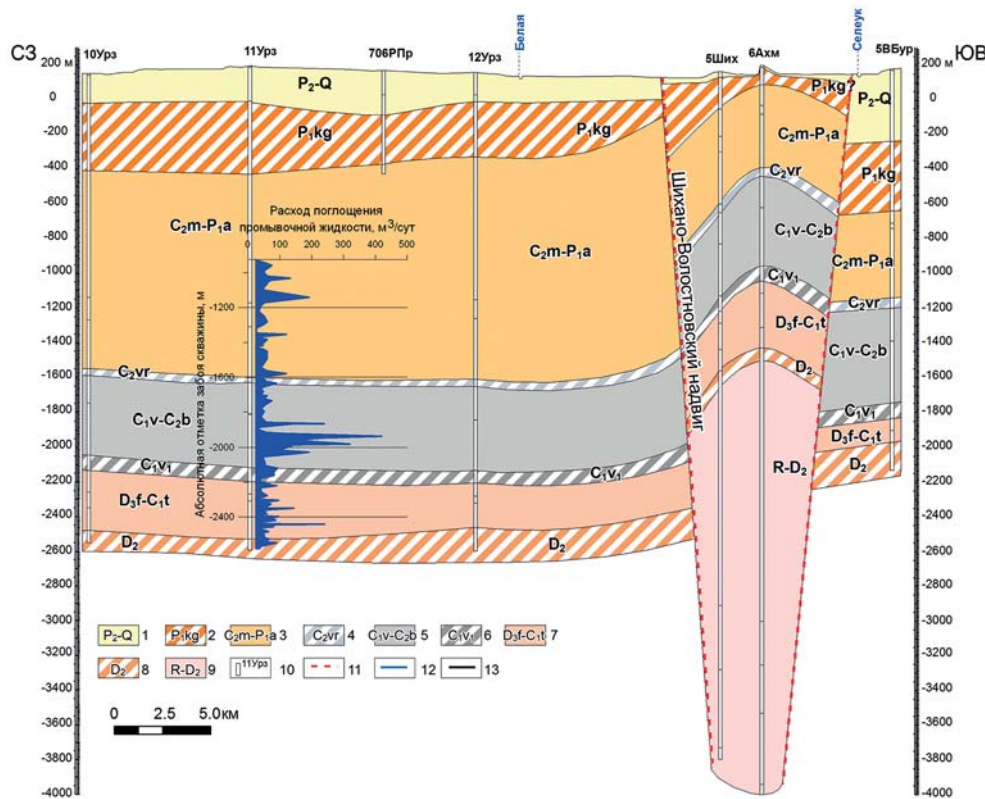
В тектоническом плане территория относится к зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и Предуральского прогиба. Глубоким бурением в палеозойских и докембрийских отложениях Предуральского прогиба обнаружены многочисленные региональные надвиги, прослеживающиеся параллельно Уралу на многие десятки километров (рис. 1). В гидрогеодинамическом отношении надвиговые дислокации в прогибе и на западном склоне орогена чаще всего служат экранами [6].

Визейско-башкирский водоносный комплекс на территории исследований в кровле рассматриваемого водоносного комплекса изолирован от зоны интенсивного водообмена регионально выдержанными верейским и кунгурским водоупорами (рис. 1). На рис. 2

представлена цифровая трехмерная геологическая модель территории исследований. Как видно из данного рисунка, для кровли и подошвы артинского горизонта, верейского водоупора и визейско-башкирского водоносного комплекса характерен выраженный региональный уклон в южном направлении, абсолютная отметка подошвы визейско-башкирского водоносного комплекса понижается с 2,1 км (на промплощадке АО «БСК») до 3,3 км в юго-западной части модели. Таким образом, перепад абсолютных отметок подошвы визейско-башкирского водоносного комплекса между указанными участками составляет 1,2 км. На рис. 1 и 2 видно, что восточнее промплощадки АО «БСК» расположен Шихано-Волостновский надвиг, отделяющий восточную окраину Восточно-Европейской платформы от Предуральского прогиба.

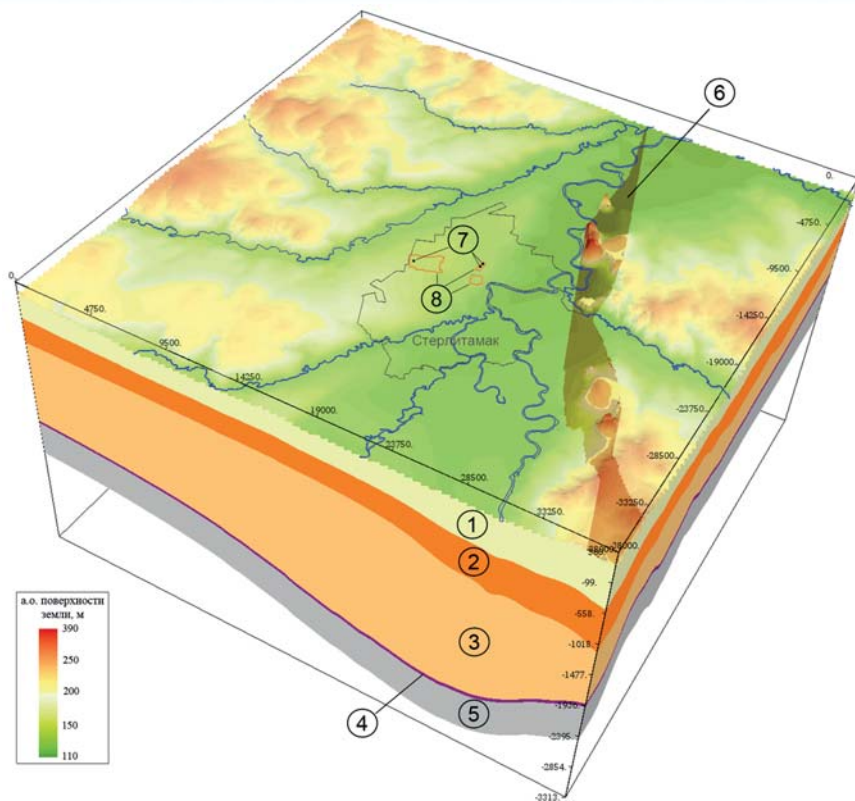
Для надсолевой толщи водовмещающих отложений характерны условия зоны активного водообмена, для подсолевой толщи — условия зоны затрудненного водообмена.

Питание подземных вод зоны активного водообмена происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и фильтрационных потерь из поверхностных водотоков преимущественно на возвышенных участках рельефа. Разгрузка подземных вод надсолевой толщи



**Рис. 1. Гидрогеологический разрез территории исследований по широте г. Стерлитамак:**  
 1 — водоносная надкунгурская толща, глины, суглинки, супеси, пески, галечники, песчаники, алевролиты, аргиллиты, мергели, доломиты; 2 — водоупорный кунгурский горизонт, доломиты, известняки, ангидриты с прослоями гипсов, каменная соль с прослоями доломитов и известняков, песчаники, алевролиты; 3 — водоносный московско-артинский комплекс, органогенно-обломочные рифовые известняки, доломиты, мергели, глинистые известняки, песчаники, алевролиты, конгломераты, аргиллиты, алевролиты; 4 — водоупорный верейский горизонт, известняки окремненные, глинистые сланцы, доломиты плотные крепкие; 5 — водоносный визейско-башкирский комплекс, доломиты, известняки, мелкокристаллические; 6 — водоупорный тульско-бобриковский горизонт, аргиллиты, алевролиты с прослоями песчаников; 7 — водоносный франско-турнейский комплекс, известняки доломитизированные, окремненные, глинистые, брекчии

карбонатных пород на глинистом цементе, доломиты кристаллические с редкими прослоями окремненных известняков, аргиллиты, алевролиты, песчаники; 8 — кыновско-доманиковский водоупор, известняки, сланцы битуминозные, песчаники кварцевые, алевролиты, выше — известняки, доломиты с проявлениями нефти, битума и прослоями зеленоватых аргиллитов; 9 — водоносный рифейско-среднедевонский комплекс, конгломераты, песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки; 10 — скважина, ее номер; 11 — надвиг; 12 — график изменения удельного веса бурового раствора с глубиной при проходке скважины 11Ur3; 13 — график изменения удельного веса промывочной жидкости с глубиной при проходке скважины 11Ur3.



**Рис. 2.** Цифровая геологическая модель территории исследований: 1 — надкунгурская водоносная толща, 2 — водоупорный кунгурский горизонт, 3 — московско-артинский водоносный комплекс, 4 — верейский водоупорный горизонт; 5 — визейско-башкирский водоносный комплекс; 6 — Шихано-Волостновский надвиг; 7 — предполагаемые места размещения закачных скважин; 8 — промплощадки ОАО «БСК»

происходит субаквальным путем, а также за счет эвапотранспирации грунтовых вод.

Попытки дать количественные оценки гидродинамических условий подсолевой толщи осадочных пород для рассматриваемой территории на основе анализа приведенных напоров были сделаны в целом ряде работ, опубликованных преимущественно в конце XX в. [6].

Визейско-башкирский водоносный комплекс на территории г. Sterlitamak относится к зоне затрудненного водообмена, при этом распределение пластовых давлений в пределах рассматриваемой гидрогеодинамической структуры имеет гидростатический характер [6].

Как показано в работе [4], в таких условиях латеральные потоки подземных вод в зоне затрудненного водообмена характеризуются исчезающе малыми гидравлическими уклонами и скоростями фильтрации. Гидравлические уклоны и направление геофильтрационного потока при этом не могут быть оценены по соотношению приведенных напоров в силу значительных технических ошибок определения последних в реальных условиях.

В таких условиях питание водоносных подразделений подсолевой толщи происходит на относительно возвышенных участках [6] (на региональных водоразделах) за счет перетекания (с весьма низкими скоро-

стями) через кунгурский водоупор на участках фациального замещения галитов, гипсов и ангидритов терригенными отложениями (аргиллитами, алевролитами) или доломитами и известняками.

Вопрос о разгрузке подземных вод подсолевой толщи является дискуссионным, в работе [6] отмечено, что она происходит в крупных речных долинах путем восходящего перетекания. С этим можно согласиться лишь частично. Значительную роль в формировании гидродинамического поля подсолевой толщи могут играть также плотностные гравитационные потоки, обусловленные вариациями минерализации подземных вод в плане и разрезе. Условия, благоприятные для накопления соленых вод и рассолов на территории Урало-Поволжья, существовали на протяжении всего верхнего протерозоя и палеозоя [6]. Присутствие в разрезе седиментационных доломитов указывает на существование аридного климата и высокую минерализацию водоемов еще в рифейско-вендское время.

В процессе формирования соленосной кунгурской толщи вариации минерализации подземных вод в плане и разрезе могли быть вызваны поступле-

нием маточной рапы кунгурского седиментационного бассейна в отложения каменноугольного и девонского возрастов. В современных условиях плотностные потоки в подкунгурских отложениях могут быть связаны с поступлением в них более плотных соленых вод вследствие выщелачивания соленосных формаций кунгура. Количественные оценки этого процесса в геологическом масштабе времени для Соликамской депрессии даны в работе [4] на основе численного моделирования.

Фильтрационная сила  $\vec{F}$ , обуславливающая движение подземных вод (геофильтрацию), определяется градиентом давления и вариациями плотности геофлюида в пространстве:

$$\vec{F} = -(\nabla p - \rho g),$$

где  $p$  — давление флюида,  $g$  — ускорение свободного падения (ось  $z$  направлена вниз). Поле скоростей фильтрации в соответствии с обобщенной формулировкой закона Дарси может быть записано в виде:

$$\vec{v} = \frac{\bar{k}}{\eta} \vec{F},$$

где  $\bar{k}$  — проницаемость среды (тензор),  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости флюида.

В подземной гидросфере фильтрационные силы обуславливаются следующими основными причинами.

1. Большой круговорот воды в природе, связывающий атмосферные, поверхностные и подземные воды и обусловленный солнечной радиацией.

2. Техногенные факторы (отбор подземных вод, закачка проток в пластовые системы), вызывающие изменение давления флюидов.

3. Изменение напряженного состояния водонасыщенных горных пород, обусловленное, например, компрессией горных пород в процессе осадконакопления и эпигенеза, в результате которой могут возникать аномально высокие пластовые давления (АВПД).

4. Гравитационная тепловая конвекция, возникающая при наличии внутренних источников тепла в водоносной толще, которые создают тепловые аномалии и соответственно гидродинамическую неустойчивость.

5. Гравитационная солевая конвекция, обусловленная аномальным распределением минерализации подземных вод в плане и разрезе, вызывающим гидродинамическую неустойчивость.

В рассматриваемых условиях при отсутствии глубинных тепловых источников, которые могли бы вызвать тепловую аномалию и тепловую конвекцию в нормальном гидрогеохимическом разрезе (отсутствует гидрогеохимическая инверсия) следует признать, что основной движущей силой регионального геофильтрационного потока является большой круговорот воды в природе, который обеспечивает инфильтрационное питание подземных вод. В таком случае, региональный геофильтрационный поток в зоне затрудненного водообмена должен (в сильно «сглаженном» виде) иметь те же области питания и разгрузки, что и поток в зоне интенсивного водообмена, однако скорости фильтрации (латеральные и тангенциальные) в зоне затрудненного водообмена при этом будут на порядки меньше, чем в зоне интенсивного водообмена.

Количественная оценка гидродинамических условий глубоких пластовых систем территории исследований, а также прогнозные расчеты распространения закачиваемых стоков в геологической среде выполнялись на основе численного моделирования. Геофильтрационная и геомиграционная модели объекта исследования разработаны с использованием программного комплекса PMWIN-8 [10].

#### **Разработка геофильтрационной модели**

Принимая во внимание специфику поставленной задачи, режим геофильтрационного и геомиграционного потоков рассматривается как нестационарный. Пространственная структура геофильтрационного и геомиграционного потоков принята трехмерной.

При моделировании рассматриваются следующие водоносные и водоупорные толщи:

- надкунгурская водовмещающая толща (грунтовые воды);
- кунгурский водоупор;
- московско-артинский водоносный комплекс (буферный горизонт);
- верейский водоупор;
- визейско-башкирский водоносный комплекс (коллектор).

Размеры моделируемой области определяются зоной гидродинамического влияния закачки отходов в пласт-коллектор, радиус которой, рассчитанный по известной формуле, составил 19 км. В качестве нижней (также непроницаемой) границы модели задана кровля тульско-бобриковского водоупора.

При моделировании, исходя из условий консервативности постановки расчетов, принято, что формирование геофильтрационного потока на территории исследований происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков.

Разгрузка геофильтрационного потока при этом происходит в речную сеть (р. Белая и ее притоки), а также испарением и транспирацией грунтовых вод.

Данные по проницаемости и пористости водоносных и водоупорных толщ палеозойских отложений для близкой по гидрогеологическим условиям территории Пермского Приуралья приведены в монографии [2]. Из нее следует, что характерные значения проницаемости трещиноватых терригенно-карбонатных палеозойских пород составляют 7–10 мД. Эти величины хорошо согласуются с данными интерпретации опытно-фильтрационных работ на действующих полигонах глубинного захоронения. Значение проницаемости 10 мД (0,01 Д) принято на модели для визейско-башкирского и московско-артинского водоносных комплексов. Коэффициент вертикальной анизотропии (соотношение горизонтального и вертикального коэффициентов проницаемости) принят для всех рассматриваемых водоносных подразделений в соответствии с имеющимися данными [2], равным 10.

Проницаемость надкунгурской водоносной толщи принята различной для 2 зон: 1 — зоны распространения аллювиальных отложений и 2 — зоны распространения отложений неаллювиального генезиса, проницаемость зон уточнялась в процессе калибровки.

Данные о фильтрационных свойствах верейского водоупора на территории исследований отсутствуют. Следует заметить, что на территории БПАБ верейский водоупор залегает в зоне затрудненного водообмена на глубинах более 1 км и представлен (по данным ГТР скважины 12 Уразметовской площади) плотными аргиллитами с прослоями известняков мощностью 32 м.

Характерные значения проницаемости терригенных верейских отложений для территории Пермского Предуралья составляют 0,1 мД [2] (соответствует коэффициенту фильтрации порядка  $10^{-4}$  м/сут). Значение проницаемости верейского водоупора 0,1 мД принято в дальнейшем для модельных расчетов.

Принимая во внимание консервативную постановку задачи о прогнозировании миграции закачиваемых отходов в геологической среде, проницаемость кунгурского водоупора принята  $10^{-4}$  мД (такой же как для верейского водоупора).

Геофильтрационные и геомиграционные параметры, принятые для математического моделирования участка закачки ДЖ показаны в таблице.

Водоносный (водоупорный) комплекс (горизонт)	Мощность (диапазон изменения в пределах участка моделирования, м)	Пористость, (-)	Параметр продольной гидродинамической дисперсии, м	Проницаемость, Д	Упруго-емкость, 1/м	Расчетный расход закачки, м <sup>3</sup> /сут	Минерализация пластовой воды, г/л
Надкунгурская водоносная толща	0–474	0,25	5	0,1–100	1,0E–03	—	0,5–100
Кунгурский водоупор	0–780	0,1	5	1,0E–04	1,0E–04	—	254
Водоносный московско-артинский комплекс	330–2023	0,1	5	0,01	1,0E–05	—	254
Верейский водоупор	30–64	0,1	5	1,0E–04	1,0E–05	—	300
Визейско-башкирский водоносный комплекс	435–589	0,05	5	0,01	5,9E–07	2000	300

На модели учтены действующие водозаборы подземных вод. Дебит водозаборов задан равным оцененным запасам. Расположение водозаборов показано на рис. 3 и 4. Все водозаборы задавались в 1 модельном слое (надкунгурская водоносная толща). Суммарный дебит подземного водоотбора составил на модели 140,85 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Ближайшим к участку закачки дистиллерной жидкости эксплуатируемым нефтяным месторождением является Цветаевское, приуроченное к нижнепермским отложениям, покрывкой для которых является кунгурский водоупор. При геофильтрационном моделировании суммарный среднесуточный отбор жидкости (нефти и подземной воды) задавался (по 2017 г.) с постоянным дебитом — 4,8 тыс. т/год.

На стадии сборки и калибровки геофильтрационной модели использована сетка с размерами ячеек 200×200 м в плане. На этапе решения геофильтрационной задачи (сборка и калибровка модели) модельная сетка состояла из 5 слоев в соответствии с принятой гидрогеологической стратификацией разреза.

При калибровке геофильтрационной модели уточнялись следующие параметры питания и строения надкунгурской водоносной толщи:

- коэффициенты фильтрации аллювиальных отложений и отложений иного генезиса;
- расчетная величина площадного инфильтрационного питания;
- латеральный коэффициент перетока Шихано-Волостновского надвига.

Следует отметить, что по результатам калибровки латеральный коэффициент перетока Шихано-Волостновского надвига (отношение коэффициента фильтрации к толщине надвига) получился весьма низким (порядка 10<sup>-6</sup> 1/сут). Данное значение близко к значению, полученному в работе [3] для Аргаяшского надвига (Зауралье). Таким образом, подтверждается представление о региональных надвиговых дислокациях, прослеживающихся параллельно Уралу, как об относительно слабопроницаемых экранах.

При калибровке геофильтрационной модели не учитывались плотностные эффекты, которые наиболее существенно могут проявляться в глубоких пластовых системах зоны затрудненного водообмена и практически не оказывают влияния на надкунгурскую во-

доносную толщу, для напоров которой осуществляется калибровка. Направление и скорости геофильтрационного потока в подсолевой толще, подземные воды которой характеризуются высокой минерализацией, зависят не только от ее гидродинамического взаимодействия с надсолевыми водоносными горизонтами и комплексами, но и от распределения плотности подземных вод в плане и разрезе. Последнее, в свою очередь, зависит от пространственного распределения суммарной минерализации подземных вод, которая в рассматриваемых условиях определяется особенностями геологической истории региона (накоплением в верхней части геологического разреза эвапоритов в течение геологического времени с последующим их выщелачиванием подземными водами).

Плотность подземных вод в рассматриваемых условиях, характеризующихся нормальным геотермическим градиентом и пластовым давлением, определяется преимущественно их минерализацией, причем зависимость плотности от минерализации может быть описана линейной функцией [4].

Обобщенные сведения об изменении минерализации подземных вод с глубиной по данным скважин разведочных площадей свидетельствуют, что для интервала глубин 1800–2300 м, соответствующего интервалу залегания визейско-башкирского водоносного комплекса на участке предполагаемой закачки ДЖ, минерализация составляет около 264 г/л.

Для московско-артинского водоносного комплекса на участке предполагаемой закачки ДЖ, минерализация составляет около 230 г/л. Для визейско-башкирского водоносного комплекса принята минерализация 300 г/л.

После калибровки геофильтрационной модели для условно пресных вод дополнительно был проведен расчет эквивалентных напоров пресной воды для всей рассматриваемой гидрогеодинамической системы при условии, что минерализация подземных вод в разрезе распределяется в соответствии с имеющимися данными следующим образом:

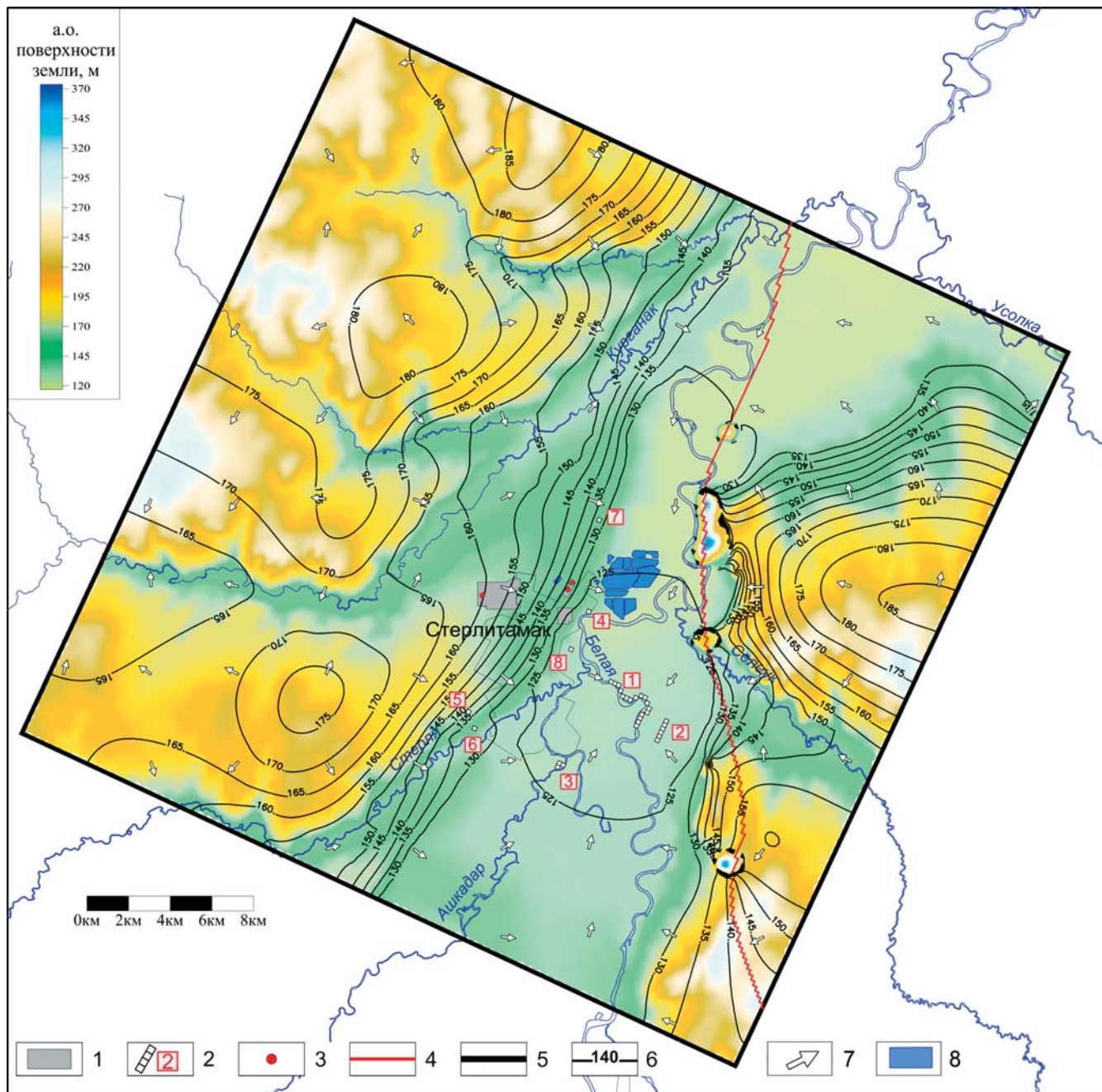
- надкунгурская водоносная толща 0,5 г/л;
- кунгурский водоупор и московско-артинский водоносный комплекс 254 г/л;
- верейский водоупор и визейско-башкирский водоносный комплекс 300 г/л.

На рис. 3 и 4 представлены модельные карты напоров надкунгурской водовмещающей толщи и визейско-башкирского водоносного комплекса, построенные с учетом плотностных эффектов в подсолевой толще. Из приведенных карт следует, что конфигурация линий равных напоров водоносных подразделений зоны затрудненного водообмена в значительной степени отличается от конфигурации линий равных напоров надкунгурской водоносной толщи. Геофильтрационный поток в визейско-башкирском водоносном комплексе на участке предполагаемой закачки ДЖ направлен на юг-юго-восток в

соответствии с региональным уклоном подошвы комплекса.

Предварительное обоснование интервалов закачки ДЖ выполнено на основе данных по разведочной скважине 11Урз (Уразметовская площадь), расположенной в 8 км западнее г. Стерлитамак (рис. 1). Визейско-башкирский водоносный комплекс (пласт-коллектор) в скважине 11Урз вскрыт в интервале глубин 1832–2311 м, общая мощность его составляет 479 м. Абсолютная отметка кровли составляет –1635,3 м, подошвы – 2114,3 м.

Из графика изменения расхода поглощения промышленной жидкости, представленного на рис. 1, видно,



**Рис. 3. Карта модельных напоров надкунгурской водовмещающей толщи:** 1 — промплощадки; 2 — водозаборы подземных вод, их условные номера на геоинфильтрационной модели; 3 — предполагаемые места размещения закачных скважин; 4 — фильтрационный барьер (Шихано-Волостновский надвиг); 5 — границы модели; 6 — гидроизоэпызы надкунгурской водовмещающей толщи; 7 — направление потока подземных вод; 8 — технологические водоемы

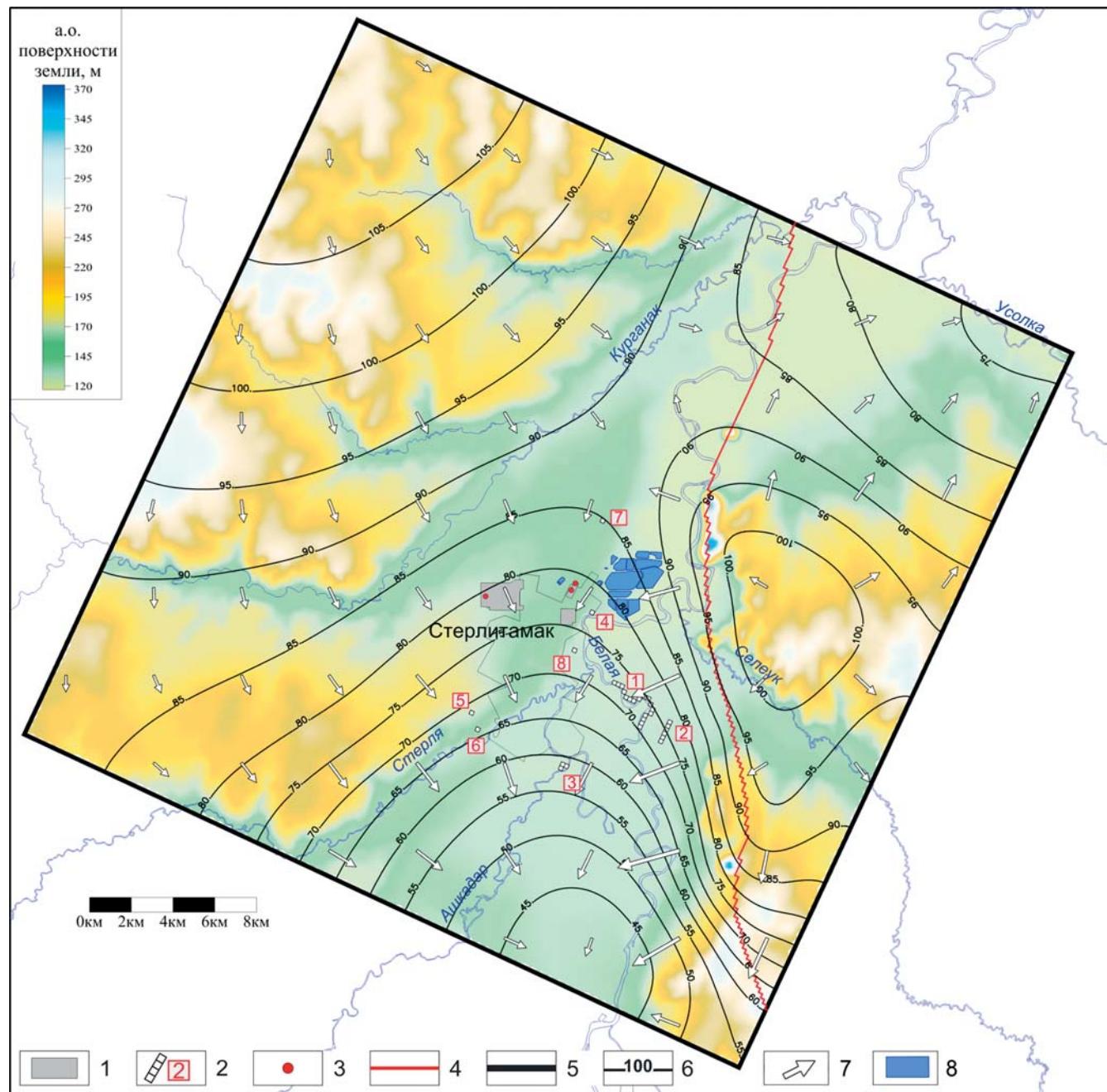
что в пределах визейско-башкирского водоносного комплекса в интервале глубин 2100–2250 м наблюдаются участки поглощения промывочной жидкости с расходом до 420 м<sup>3</sup>/сут, приуроченные, по-видимому, к заржавленным зонам.

Интервалы повышенного поглощения бурового раствора в скважине 11 соответствуют отложениям визейского яруса — доломитам и известнякам, причем породы в интервале глубин 2116–2216 (а.о. от 1919,3 до 2016,3 м) в описании скважины выделены как водоносные. В геологическом разрезе скважины 12Урз соответствующий водоносный интервал выделялся в

интервале глубин 2114–2156 м (а.о. от 1954,6 до 1996,6 м). Данный интервал выбран для предварительного прогноза закачки ДЖ.

Параметры гидродинамической дисперсии и коэффициент молекулярной диффузии были приняты для прогнозных расчетов в соответствии с имеющимися рекомендациями [8].

Прогнозные расчеты по оценке возможности выхода закачиваемых стоков в грунтовые воды и р. Белая выполнялись с нескольких возможных точек заложения закачных скважин, определенных при проведении рекогносцировочных работ. Далее рассматриваются



**Рис. 4. Карта модельных напоров визейско-башкирского водоносного комплекса:** 1–5 — услов. обозначения см. на рис. 3, 6 — гидроизоэпызы визейско-башкирского водоносного комплекса; 7 — направление потока подземных вод; 8 — технологические водоемы



результаты, полученные для точки, расположенной наиболее близко к р. Белая на расстоянии около 1,5 км от нее.

В рассмотренном консервативном варианте расчетной модели региональный геофильтрационный поток пластовых вод на участке закачки направлен к долине р. Белая, что, как отмечено выше, маловероятно и принято только для повышения консервативности прогноза.

На математической модели воспроизводилась закачка ДЖ в течение 25 лет со среднесуточным дебитом 2 000 м<sup>3</sup>/сут. После прекращения закачки на модели рассматривались естественные гидрогеодинамические условия, соответствующие современным, воспроизведенным при калибровке геофильтрационной модели в ее консервативном варианте.

Фоновая минерализация подземных вод для всех рассматриваемых водоносных подразделений задавалась равной 300 г/л, что обеспечивает консервативный учет всплывания ДЖ, характеризующейся меньшей плотностью в геофильтрационном потоке. Минерализация ДЖ также принята в консервативной постановке равной ее минимальному значению — 160 г/л.

На этапе решения геофильтрационной задачи модельная сетка состояла из 5 слоев в соответствии с принятой гидрогеологической стратификацией разреза. При геомиграционных расчетах осуществлялась детализация модельных слоев по вертикали до 20×20 м на участке инъекции ДЖ. При моделировании миграции ДЖ в пласте-коллекторе на участках возможного расположения нагнетательных скважин размеры ячеек сетки в плане уменьшены до 50×50 м.

Результаты моделирования ореола сточных вод, формирующегося при закачке и после ее прекращения, представлены в виде максимальных прогнозных ореолов ДЖ в потоке подземных вод в плане (максимальные ореолы на 1000 лет после прекращения закачки) и прогнозных ореолов ДЖ в разрезе на 25, 100, 500 и 1000 лет.

В качестве внешней границы ореола ДЖ условно принята изолиния минерализации 299 г/л (фоновая минерализация подземных вод принята 300 г/л, минерализация ДЖ 160 г/л). Особенностью миграции ДЖ в рассматриваемой ситуации является ее медленное «всплывание» вследствие плотностной конвекции, наиболее существенно проявляющееся после прекращения закачки.

На рис. 4 показано максимальное распространение ДЖ в плане на 1000 лет с момента прекращения закачки. Форма ореола в плане близка к окружности,

имеющей диаметр около 2 км. Прогнозные расчеты (рис. 5 и 6а) показали, что на момент прекращения закачки в пласте-коллекторе формируется область распространения ДЖ, имеющая форму, близкую к эллипсоиду вращения. Размеры области составляют около 1,5 км в плане и 400 м в разрезе.

После прекращения закачки ДЖ ореол мигрирует на восток-юго-восток к долине р. Белая в соответствии с направлением регионального геофильтрационного потока и одновременно с этим вверх по разрезу пласта вследствие плотностной конвекции. Перемещение центра масс ореола за 1000 лет в плане составляет около 200 м, в разрезе — около 300 м. В процессе миграции происходит разубоживание ореола вследствие гидродинамической дисперсии и молекулярной диффузии.

Верхней границей распространения ореола является кровля верейского водоупора. Миграция ДЖ через водоупор происходит преимущественно за счет молекулярной диффузии. Максимальный (на 1000 лет) прогнозный ореол, представленный на рис. 6б, формируется в рассматриваемых условиях на подошве верейского водоупора на глубине около 1800 м.

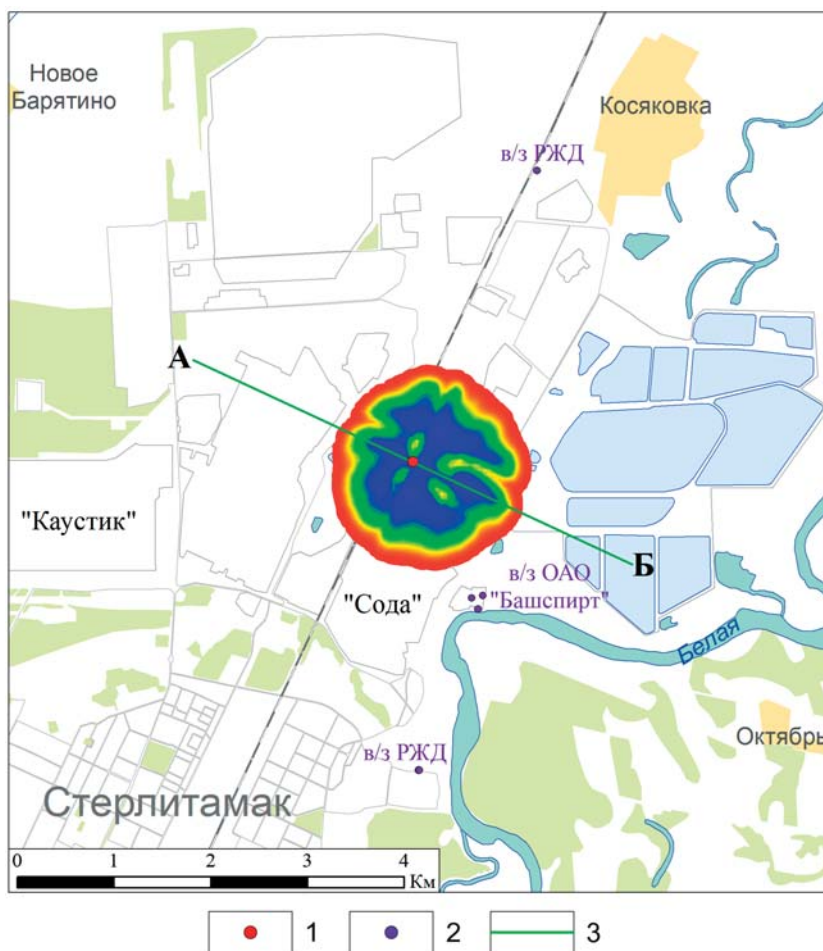


Рис. 5. Максимальный прогнозный размер и положение ореола ДЖ в виейско-башкирском водоносном комплексе на участке 1 через 1000 лет после прекращения закачки (проекция на дневную поверхность): 1 — закачная скважина, 2 — точечный водозабор, 3 — линия разреза для показа результатов модельных расчетов

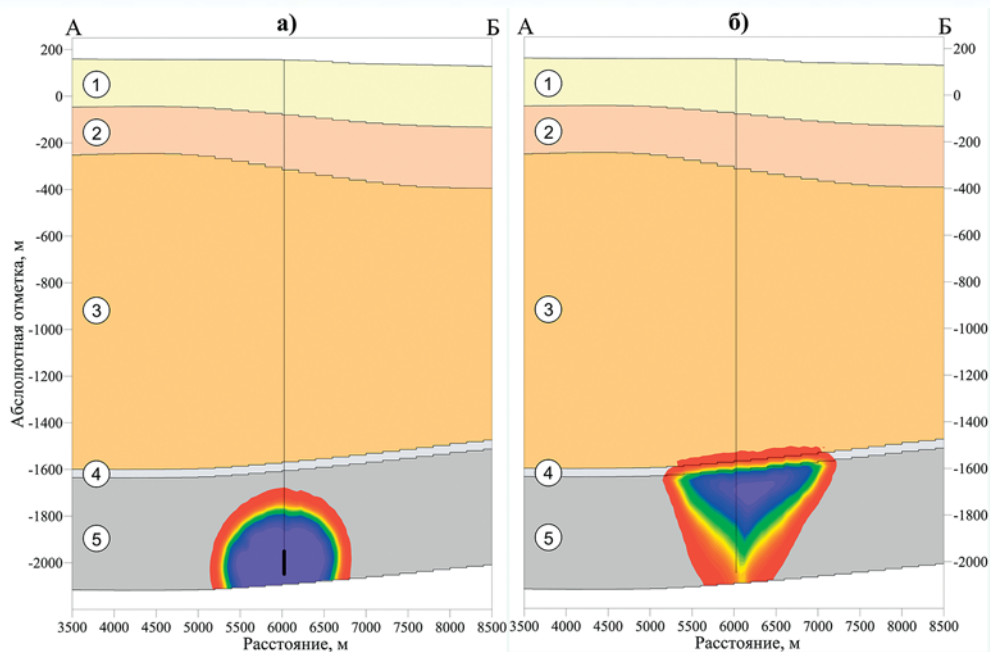
Перспективными для закачки ДЖ представляются также выделенные при бурении скважины 12Урз интервалы относительно хорошо проницаемых интервалов разреза московско-артинского водоносного комплекса: мячковского горизонта на глубинах 1465–1504 м и 1548–1564 м и водоносные породы подольского горизонта в интервале глубин 1702–1720 м.

Прогнозные геомиграционные расчеты показали, что в случае закачки ДЖ в московско-артинский водоносный комплекс выход ее на поверхность или попадание в грунтовые воды, питающие р. Белая, также не произойдет.

Следует заметить, что пласт-коллектор при прогнозных расчетах рассматривался как однородный анизотропный по фильтрационным свойствам. Как показывают наблюдения на действующих полигонах закачки отходов, в реальных условиях пласт-коллектор будет характеризоваться скорее, как неоднородный. В работе [1] приведены результаты тестового моделирования миграции жидкости низкой плотности, закаченной в пласт-коллектор, насыщенный жидкостью высокой плотности при трех вариантах строения пласта-коллектора: однородном изотропном, однородном анизотропном, слоистом и неоднородном. Модельные расчеты показали, что реальная неоднородность пород, так же, как и плотностные эффекты, существенно влияет на формирование области, заполненной отходами. В гетерогенной среде, которая наиболее близка к реальной неоднородности пласта-коллектора, промстоки стремятся заполнить в первую очередь участки хорошо проницаемых пород и распространяются быстрее по латерали, а не по вертикали. В результате в пласте-коллекторе образуется «залежь» промстоков сложной формы, в которой происходит быстрое выравнивание поля минерализации подземных вод.

Таким образом, рассмотренный в настоящей статье вариант геофильтрационного строения визейско-башкирского пласта-коллектора является консервативным.

Оценка гетерогенного взаимодействия дистиллерной жидкости с пластовыми водами и породами рабочего пласта-коллектора была выполнена с использованием термодинамического моделирования. Установлено, что дистиллерная жидкость по своим физико-химическим свойствам близка к составу пла-



**Рис. 6. Прогноз положения ореола ДЖ в визейско-башкирском водоносном комплексе (разрез) на участке 1:** а) через 25 лет с начала закачки, б) 1000 лет после прекращения закачки: 1 — надкунгурская водоносная толща; 2 — водоупорный кунгурский горизонт; 3 — московско-артинский водоносный комплекс; 4 — верейский водоупорный горизонт; 5 — визейско-башкирский водоносный комплекс

стовых вод рабочего горизонта, только характеризуется менее высокой минерализацией. Доказана совместимость промстоков, пластовых вод и пород предполагаемого горизонта закачки. При этом в известняках будет происходить отложение кальцита в небольших объемах и растворение гипса (также в небольших объемах), а в доломитах будет растворяться до 15 % их объема при приблизительно таком же приращении объема кальцита.

#### Заключение

Результаты выполненных исследований, а также многолетний опыт закачки ДЖ на объекте «Кама-2» АО «БСК» свидетельствуют о возможности и целесообразности создания сооружений для закачки ДЖ в глубокие горизонты.

Возможность выхода закачанной дистиллерной жидкости на поверхность земли или попадание ее в грунтовые воды, питающие р. Белая, оценена с помощью математического моделирования, выполненного в консервативной постановке. При разработке математической (геофильтрационной и геомиграционной) модели учтен весь доступный объем геолого-гидрогеологической информации по району, а также многолетний опыт закачки жидких отходов в глубокие пластовые системы на объекте «Кама-1» и закачки сточной воды (дистиллерной жидкости) на объекте «Кама-2».

Прогнозные модельные расчеты показали, что закачанная в пласт-коллектор дистиллерная жидкость в течение расчетного прогнозного периода, составляющего 1000 лет, практически локализуется в пределах полигона. Максимальные размеры ореола дистиллерной жидкости в плане не превысят 2000 м.

Перемещение центра масс ореола дистиллерной жидкости в пласте-коллекторе по направлению к долине р. Белая за указанный срок не превысит 900 м, перемещение вверх по разрезу пласта-коллектора не превысит 400 м. Таким образом, результаты математического моделирования работы полигона глубинного захоронения дистиллерной жидкости при закачке ее в башкирско-визейский или московско-артинский водоносные комплексы свидетельствуют, что выход закачанной дистиллерной жидкости на поверхность земли или попадание ее в грунтовые воды, питающие р. Белая, полностью исключен.

Закачка ДЖ в глубокие горизонты является экологически обоснованной и эффективной технологией по удалению ДЖ и исключению ее воздействия на природные объекты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Байдарико, Е.А. Моделирование свободной восходящей миграции промстоков в неоднородном водоносном пласте / Е.А. Байдарико, С.П. Поздняков // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2010. — № 6. — С. 544–554.
2. Всеволожский, В.А. Подземный сток и водный баланс платформенных структур / В.А. Всеволожский. — М.: Недра, 1983.

3. Глинский, М.Л. Численное моделирование захоронения жидких промстоков ПО «Маяк» в глубокие горизонты Теча-Бродской структуры / М.Л. Глинский, А.А. Куваев, С.А. Тер-Саакян, К.В. Белов, С.П. Поздняков // Разведка и охрана недр. — 2012. — № 10. — С. 55–59.
4. Куваев, А.А. Геофильтрационные модели потоков подземных вод переменной минерализации / А.А. Куваев: Дисс... д. г.-м. н. — М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2002.
5. Миронов, Е.А. Закачка промышленных сточных вод в продуктивные и поглощающие горизонты / Е.А. Миронов. — М.: Недра, 1971.
6. Попов, В.Г. Гидрогеохимия и гидрогеодинамика Предуралья / В.Г. Попов. — М.: Наука, 1985.
7. Приходько, Н.К. Подземное захоронение промстоков через укрепленные скважины, сооруженные с использованием ядерных взрывов / Н.К. Приходько, А.П. Васильев. — М.: ИздАТ, 2007.
8. Румынин, В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии / В.Г. Румынин. — СПб.: Наука, 2011.
9. Шокин, И.Н. Технология соды / И.Н. Шокин, С.А. Крашенинников. — М.: Химия, 1975.
10. Wen-Hsing Chiang; Wolfgang Kinzelbach. 3D-groundwater modeling with PMWIN: a simulation system for modeling groundwater flow and pollution / Wen-Hsing Chiang, Wolfgang Kinzelbach. — Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo: Springer, 2000.

© Коллектив авторов, 2019

Куваев Андрей Алексеевич // andrey\_kuvaev@inbox.ru  
Кннов Дмитрий Владимирович // dvk2010@gmail.com  
Святовец Сергей Владимирович // ssv@msnr.ru  
Спешиллов Сергей Леонидович // speshilov1959@gmail.com  
Афанасьев Федор Игнатьевич // Afanasev@soda.ru  
Шаяхметова Лена Римовна // Shayakhmetova.LR@soda.ru

## ХРОНИКА

### ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ

28–29 мая 2019 г. в Иркутске в АО «УРАНГЕО» состоялось очередное Заседание Координационного научно-технического совета (КНТС) по геологии, поискам и разведке месторождений урана, посвященное проблемам расширения минерально-сырьевой базы (МСБ) урана и современным технологиям выявления новых объектов.

Заседание прошло под председательством руководителя КНТС, генерального директора ФГБУ «ВИМС», доктора геолого-минералогических наук, профессора Г.А. Машковцева. В совещании приняли участие представители производственных организаций (АО «УРАНГЕО», АО «АРМЗ», АО «ППГХО», АО «Хиагда», АО «Далур», ООО «Сибирь Геопоиск», АО «Сосновгео», ООО ПКФ «Геосигма», АО «Сосновгеос»), отраслевых институтов (ФГБУ «ВИМС», ФГБУ «ВСЕГЕИ», НИИ Ирригиредмет), а также академических институтов и вузов (ФГБУ «ИГХ СО РАН», ФГАОУ ВО «НИ ТПУ», ФГБОУ ВО «ИРНТУ», РХТУ им. Д.И. Менделеева).

В рамках секции «Современное состояние МСБ урана РФ и перспективы ее развития» заслушаны доклады, посвященные мировой МСБ урана, состоянию и перспективам развития уранодобывающей отрасли Российской Федерации, основным направлениям

развития отечественной урановой МСБ и перспективам выявления месторождений урана, итогам геологоразведочных работ (ГРП) на уран за 2018 г. В сообщениях дана оценка перспектив выявления месторождений урана в пределах рудоперспективных структур Дальневосточного региона, Кузнецко-Алатаусской металлогенической зоны, Урулюнгуевского горнорудного района, Юго-Востока Анабарского щита, Севера Енисейского кряжа и Зауралья. Представлена серия докладов, касающихся освоения резервных месторождений и объектов Витимского урановорудного района (УРР) методом скважинного подземного выщелачивания.

По результатам работы секции сделан вывод — мировой спрос на уран после 2025 г. будет устойчиво превышать предложение. В ближайшей и среднесрочной перспективе будут отработаны наиболее дешевые казахстанские месторождения песчаникового типа, позже канадские месторождения «несогласия», что неизбежно повлечет за собой рост цен на уран. В России в 2035–2040 гг. будут полностью отработаны запасы месторождений Стрельцовой группы и Зауралья, осваиваемые АО «ППГХО» и АО «Далур» соответственно, и, если не предпринять усилия по поиску и подго-