

О размещении промышленных стоков в глубокозалегающие нефтегазоводоносные комплексы на территории Соликамской депрессии (Пермский край)

А.Н. Башков¹, С.Е. Башкова², Е.Е. Кожевникова^{2*}

¹ООО «Пермская геолого-геофизическая компания», Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

В настоящее время для предприятий, осуществляющих добычу полезных ископаемых на территории Соликамской депрессии весьма актуальна проблема размещения промышленных стоков, включающих подтоварные воды, сопутствующие нефтедобыче, и рассолы, образующиеся при добыче и переработке калийных солей. Наиболее экологически безопасным методом их сброса считается закачка в глубокие водоносные горизонты. В статье проанализированы правовые аспекты организации и эксплуатации полигонов глубинного захоронения, включающие как использование существующих лицензионных участков, так и процедуру получения новых лицензий для закачки промышленных стоков в глубокие водоносные горизонты. Изложены методические подходы к подземной закачке промышленных стоков, а также критерии выбора эксплуатационных объектов для этих целей. Проведен анализ геологического строения осадочных толщ северо-восточной части Волго-Уральской нефтегазоносной провинции с оценкой их пространственного распространения, фильтрационно-емкостных свойств и совместимости содержащихся в них подземных вод с закачиваемыми стоками. Установлено, что наиболее перспективным для захоронения промышленных стоков является турнейско-фаменский карбонатный комплекс. Применение комплексного подхода к оценке геологических и технологических факторов позволит выработать эффективные решения по снижению экологической нагрузки на природные системы.

Ключевые слова: нефтегазоводоносные комплексы, глубокозалегающие горизонты, промышленные стоки, подтоварные воды, избыточные рассолы, Соликамская депрессия

Для цитирования: Башков А.Н., Башкова С.Е., Кожевникова Е.Е. (2025). О размещении промышленных стоков в глубокозалегающие нефтегазоводоносные комплексы на территории Соликамской депрессии (Пермский край). *Георесурсы*, 27(4), с. 295–305. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.4.17>

Введение

Соликамская депрессия, расположенная в северо-восточной части Пермского края, характеризуется совмещением на одной территории соляных толщ (в том числе калийных залежей) и газонефтяных месторождений. Подобная сопряженность является причиной возникновения проблемы совместной разработки соляных (калийных) и нефтяных залежей, однозначного решения которой пока не найдено.

Верхнекамское месторождение калийно-магниевого солей расположено в центральной части Соликамской депрессии и сложено солями галогенной формации нижнепермского возраста. На месторождении ведется

добыча сильвинитов, карналлита, каменной соли и рассолов (рис. 1).

Впервые вопрос совмещения разработки залежей солей и углеводородов (УВ) остро встал в 1976 г., когда был получен промышленный приток нефти из глубокой скважины 17-ОГН, вскрывшей яснополянскую нефтяную залежь на Юрчукском месторождении, большая часть которого расположена под калийной толщей. Впоследствии на площади развития калийной залежи открыт еще ряд месторождений и перспективных на нефть и газ структур. На сегодня частично эта проблема решена бурением наклонно-направленных и горизонтальных скважин с большими проложениями (до нескольких километров) от устья до забоя.

Однако с ростом и расширением производства, помимо совмещения процессов добычи возникла необходимость изоляции подтоварных вод, образующихся при разведке и разработке месторождений углеводородного сырья (УВС), а также рассолов, получаемых в результате добычи и первичной переработки калийных и магневых солей. Изучение проблем, связанных с размещением

* Ответственный автор: Елена Евгеньевна Кожевникова
e-mail: eekozhevnikova@bk.ru

© 2025 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

промышленных стоков в Пермском Приуралье, также ведется с конца 60-х годов прошлого века (Быков, Полинская, 1967; Покровский и др., 1971; Гаев, 1978; Шестов, Шурубор, 1969; Гольдберг, 1968), а в 80–90-х годах этот вопрос встал особо остро (Богатырева, 1980; Зуева и др., 1983; Бахтин и др., 1985; Зуева, 1988).

Следует отметить, что минеральные рассолы не подвергаются биологической очистке, а хлорид ионы из растворов вообще не поддаются химической и биологической деструкции или осаждению. Опыт поверхностного размещения стоков показывает, что сброс избыточных рассолов в водные объекты требует значительного их разбавления,

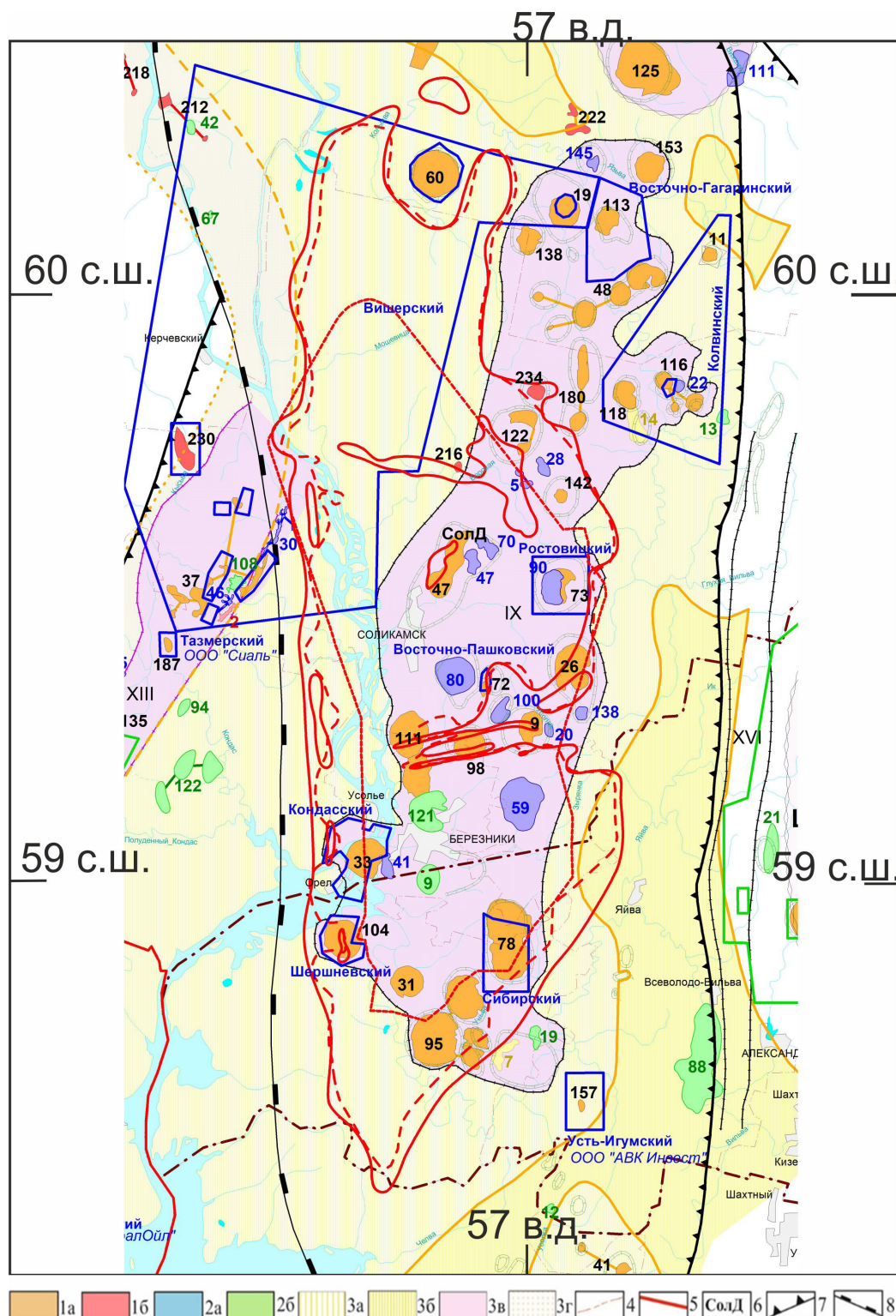


Рис. 1. Фрагмент карты фонда месторождений и структур Пермского края (по материалам ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», 2023 г.). Месторождения углеводородов: 1а – распределенного фонда, 1б – нераспределенного фонда; структуры 2а – выявленные, 2б – подготовленные; Камско-Кинельская система прогибов: 3а – осевая зона, 3б – внутренняя прибортовая зона, 3в – бортовая зона, 3г – внешняя прибортовая зона; 4 – границы административных округов Пермского края; 5 – граница Верхнекамского месторождения калийных солей; 6 – Соликамская Депрессия; 7 – границы крупных тектонических структур; 8 – граница Предуральского прогиба.

а также приводит к засолению и деградации огромных территорий, а попутные воды, получаемые при добыче нефти, загрязнены ее компонентами и требуют соответствующей очистки. Стоимость очистки или утилизации таких стоков может превышать стоимость производимой целевой продукции, поэтому весьма актуальным является размещение подтоварных вод в глубокозалегающих толщах (Кадыров, 2017; Igunnu et al., 2012; Hayes, Arthur, 2004).

Подземный сброс промышленных стоков от нефтедобычи и калийного производства в изолированные водоносные горизонты рассматривается во всем мире как наиболее перспективный способ захоронения техногенных рассолов, снижающий экологическую напряженность и направленный, прежде всего, на охрану подземных и поверхностных вод (Aust, Kreysing, 1985; Lehr Gay H., 1986; Veil John F., 1997). Однако, несмотря на достаточно большой объем накопленных знаний, полностью устраняющих эту проблему решений пока не выработано, и тема размещения по-прежнему весьма актуальна.

Согласно п. 19 ст. 1 Водного кодекса Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ, сточные воды – дождевые, талые, инфильтрационные, поливочные, дренажные воды, сточные воды централизованной системы водоотведения и другие воды, отведение (сброс) которых в водные объекты осуществляется после их использования. Рассматриваемые в настоящей статье стоки по своей сути подходят под определение сточных вод и не являются отходами.

Целью настоящей статьи является обоснование возможности экологически безопасного размещения промышленных стоков (подтоварных вод и техногенных рассолов) в глубокозалегающие нефтегазоводоносные комплексы на основе системного подхода. Для достижения поставленной цели в исследовании проанализированы правовые и нормативные аспекты организации и эксплуатации объектов глубинного захоронения промышленных стоков, рассмотрены критерии выбора эксплуатационных объектов для подземной закачки стоков, оценены особенности пространственного распространения и гидродинамическая изоляция глубоких водоносных горизонтов, рассмотрена совместимость химического состава закачиваемых промышленных стоков с пластовыми водами, и выявлены наиболее перспективные нефтегазоводоносные комплексы для размещения стоков.

Материалы и методы

В отличие от рассолов калийно-магниевого производства, которые образуются непосредственно в ходе технологического процесса, подтоварные воды, получаемые при добыче нефти, по своей природе представляют собой пластовые воды.

Хотя по составу и свойствам эти жидкости во многом схожи, возможность их размещения необходимо оценивать отдельно, как продуктов двух различных производств (рис. 2), учитывая их физико-химические особенности.

В Российской Федерации размещение в пластах горных пород попутных вод и вод, использованных для собственных производственных и технологических нужд, при разведке и добыче углеводородного сырья, а также вод, образующихся в результате разведки и добычи, а также первичной переработки калийных и магниевых солей регулируется Федеральным законом «О недрах» (ФЗ №2395-1).

Закачка попутно извлекаемых при добыче углеводородов вод, представленных высокоминерализованными рассолами, в пласты горных пород достаточно широко применяется в мировой практике (Mantell, 2011; Arthur et al., 2010; Clark et al., 2005; Nazih et al., 2009).

Порядок закачки попутных и производственных сточных вод описан в Приказе Минприроды России от 02.12.2015 N 522 «Об утверждении Положения о порядке размещения в пластах горных пород попутных вод и вод, использованных пользователями недр для собственных производственных и технологических нужд при разведке и добыче углеводородного сырья». Захоронение в данном случае осуществляется в соответствии с утвержденной проектной документацией на разработку месторождения углеводородного сырья, предусматривающей размещение указанных стоков в пластах горных пород.

Практически все месторождения УВС Соликамской депрессии находятся на второй-третьей стадиях разработки. Анализ действующей системы поддержания пластового давления показывает, что все объемы подтоварных вод могут быть задействованы для закачки, поскольку объем производственных сточных вод не превышает объемов установленных техническими проектами разработки. При этом размещение может осуществляться в границах действующей лицензии на разведку и добычу УВС.

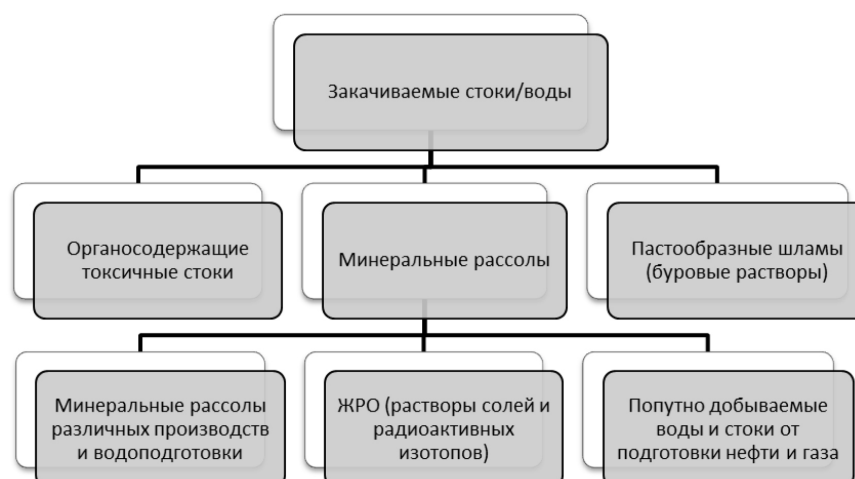


Рис. 2. Классификация стоков, подвергающихся закачке на территории РФ

Захоронение в пластах горных пород вод, образующихся в результате разведки и добычи, а также первичной переработки калийных и магниевых солей также возможно в толще горных пород, предоставленных в пользование для размещения стоков. Для этого требуется получение самостоятельной лицензии на геологическое изучение, оценку, строительство и эксплуатацию подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых.

В пределах Соликамской депрессии калийно-магниевая соленосная толща иренского горизонта нижнепермских отложений залегает на глубинах порядка 300–400 м и перекрыта сверху и снизу галитовыми пачками (Зуева, 1990). То есть, при получении соответствующей лицензии, возможна закачка рассолов в надсолевые толщи.

Верхний надсолевой комплекс пород включает в себя (снизу вверх):

- нижнюю подтолщу соликамского горизонта, залегающую непосредственно над породами соляной залежи и сложенную глинистыми мергелями с прослоями гипса, глинисто-гипсо-карбонатных слоев с желваками ангидрита, глинистых известняков и известковых глин;
- верхнюю подтолщу соляно-мергельной толщи соликамского горизонта;
- терригенно-карбонатную толщу соликамского горизонта, в нижней части разреза (~50 м) сложенную глинистыми известняками с линзами и прослоями песчаников, алевролитов и мергелей, а в верхней части (~50 м) – преимущественно песчаниками с линзами и прослоями алевролита, известняка и аргиллита;
- пестроцветную толщу шешминского горизонта, представленную переслаивающимися глинистыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами с редкими маломощными прослоями известняков. В зонах прогибов мощность их достигает 120 м, а на участках поднятий отложения толщи часто полностью выклиниваются;
- четвертичные отложения, представленные болотными, аллювиальными, аллювиально-делювиальными и элювиально-делювиальными образованиями мощностью от 5 до 15–25 м.

На сегодня имеется опыт закачки избыточных рассолов в горизонты надсолевой толщи. В частности, ПАО «Уралкалий» владеет несколькими патентами на изобретения, касающимися методов размещения указанных флюидов (Кадыров, 2017). Однако значительные объемы закачки в будущем с большой долей вероятности могут привести к переходу рассолов в водоносные слои соликамского горизонта, являющиеся основными источниками пресного водоснабжения в регионе, либо к размыву соленосной толщи с развитием весьма негативных последствий (Константинова, 2001). Таким образом, захоронение рационально рассматривать в подсолевых водоносных горизонтах с привязкой к нефтегазоводонным комплексам (НГК) и исходя из особенностей их геологического строения на рассматриваемой территории (Яковлев, 2023).

Лицензия на право пользования недрами для разведки и добычи УВС на территории Соликамской депрессии, как правило, включает в себя толщу горных пород от подошвы подстилающей каменной соли до глубин на 100 метров ниже подошвы последнего продуктивного пласта. В этих условиях получение лицензии на размещение

стоков калийного производства возможно только для более глубокозалегающих отложений.

Исходя из этого, подземное размещение образующихся рассолов возможно путем их закачки в глубокие скважины. Однако с учетом геологических условий Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС), подземное захоронение технологических рассолов методом глубинной закачки сталкивается с существенными ограничениями. Хотя закачка в глубокие горизонты технически осуществима, бурение новых поглощающих скважин осложнено следующими факторами:

- запрещено строительство глубоких скважин на территории ВКМКС в границах горных отводов действующих калийных рудников и участков детальной разведки (отрабатываемых и резервных запасов категорий А, В, С₁)¹;
- требуется создание предохранительного целика нетронутой породы радиусом не менее 200 м вокруг ствола, что приводит к выводу из эксплуатации значительных запасов калийных солей в этой охранной зоне;
- необходимо получение дополнительных разрешительных документов для устранения противоречий при размещении скважины в пределах лицензионного участка (и горного отвода) нефтедобывающего предприятия;
- весьма существенные затраты на строительство новой скважины.

Эти ограничения делают указанную схему глубинной закачки экономически нецелесообразной и технически сложно реализуемой.

С точки зрения существенного сокращения капитальных расходов по размещению стоков, логичным представляется использование глубоких скважин, уже пробуренных для целей разведки и разработки залежей углеводородного сырья. Такими могут быть скважины, выведенные из добычи, законтурные или иные, отвечающие требованиям закачки и не подлежащих дальнейшей эксплуатации по целевому назначению (Кадыров, 2017). В сложившихся условиях, пожалуй, единственным приемлемым вариантом является заключение соглашений о сотрудничестве между соле- и нефтедобывающими предприятиями, предусматривающих выкуп таких скважин или их долгосрочную аренду и последующую их реконструкцию.

Несмотря на то, что подавляющее большинство глубоких скважин в пределах Соликамской депрессии пробурены в границах открытых месторождений УВ, исключить или минимизировать риски негативного воздействия закачиваемых стоков на нефтегазовые залежи возможно при использовании для закачки скважин, расположенных в краевых частях месторождений, либо за пределами внешнего контура нефтеносности. Кроме того, требуется проведение специальных мероприятий по защите устьевого и скважинного оборудования от коррозионного воздействия.

Важным этапом в подготовке размещения подтоварных вод является выбор и обоснование эксплуатационного объекта (ЭО) под закачку, которые должны производиться на основе оценки геолого-гидрогеологических условий

¹РД 07-205-98. Инструкция по безопасному проведению работ по поискам, разведке и разработке залежей нефти на территории Верхнекамского месторождения калийных солей.

территории, а также с учетом технологических, экономических и экологических факторов (Яковлев, Шардаков, 1999; Яковлев, 1995).

Критерии выбора объекта размещения:

- отсутствие негативного воздействия на окружающую среду и залежи полезных ископаемых;
- технически и экономически приемлемые глубины залегания объекта и рентабельная удаленность от объекта образования промышленных стоков;
- достаточные толщины эксплуатационного объекта;
- удовлетворительные фильтрационно-емкостные свойства ЭО;
- совместимость закачиваемых и пластовых вод;
- отсутствие гидродинамической связи с зоной активного водообмена;
- возможность получения лицензии на пользование недрами для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых (размещение стоков).

Нормативы допустимого воздействия устанавливаются для устойчивого функционирования естественных экосистем с одновременным соблюдением качества окружающей среды. Для глубокозалегающих пластов, с точки зрения экологического влияния, норматив воздействия может быть установлен только для подземной гидросферы, поскольку нагрузка на воздух, почву, поверхностные воды отсутствует.

Исходя из определений Федерального закона № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» глубокие пласты недр, содержащие рассолы, токсичные для биоты, не могут рассматриваться ни как экосистемы, ни как природная среда. До определенных глубин (в зависимости от пластовых температур) в отложениях могут присутствовать бактерии, но это в основном организмы, потребляющие остаточные органические вещества, бедные по видовому составу, с низкой плотностью (Кадыров, 2017).

С учетом прогнозируемых объемов размещения промышленных стоков (несколько миллионов м³ в год), эксплуатационный объект, в который планируется закачка, должен обладать достаточной емкостью, обеспечиваемой выдержанностью пласта-коллектора как по толщине, так и по протяженности, высокими пустотными и фильтрационными характеристиками. Кроме того, важное значение имеет степень совместимости закачиваемых и пластовых вод, обеспечивающая недопущение выпадения осадка минеральных солей и ухудшения коллекторских свойств (Mantell, 2011).

Обсуждение результатов

Для анализа возможности размещения промышленных стоков рассмотрены характеристики основных нефтегазоводоносных комплексов, выделяемых в северо-восточной части Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (снизу-вверх) (Лядова и др., 2010), а также совместимость вод.

Девонский (эйфельско-нижнефранский) терригенный НГК представлен отложениями эйфельского и живетского ярусов и нижнефранского подъяруса.

Толщины и стратиграфическая полнота терригенной толщи девона характеризуются значительной изменчивостью – от 200 м в центральной части Пермского края до полного отсутствия в серной и южной частях.

Эйфельский ярус сложен песчаниками светло-серыми, микрозернистыми, кварцевыми, крепкими, плотными, частью слабо трещиноватыми, и алевролитами. Толщины пласта в южной части Соликамской впадины изменяются от 24 до 47 м, при этом эффективные толщины составляют от 1,1 до 5,6 м. Пористость пород-коллекторов по данным ГИС изменяется от 8,6 до 11,3%.

Живетский ярус сложен аргиллитами, алевролитами и песчаниками с битуминозно-глинистыми примазками. На некоторых участках яруса породы частично уничтожены предпашийским размывом. Суммарная мощность отложений яруса составляет от 7 до 25 м.

Нижнефранский подъярус, включающий пашийский и тиманский горизонты, сложен переслаиванием аргиллитов, алевролитов и кварцевых песчаников. Пласты по толщине и физическим свойствам пород не выдержаны. Суммарная мощность отложений яруса составляет от 11 до 36 м. Эффективные толщины колеблются от 3,4 до 6,1 м. Пористость проницаемых пропластков изменяется от 7 до 11%.

В кровле тиманского горизонта залегает глинистая пачка, которая рассматривается для всей территории Прикамья как региональный флюидоупор (Лядова и др., 2010).

Учитывая геологические особенности строения девонского НГК (большие глубины залегания, высокая расчлененность разреза, невыдержанность распространения коллекторов по площади и невысокие фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС)), следует признать, что использование этой толщи в качестве эксплуатационного объекта размещения стоков сомнительно, как с технологической, так и с экономической точек зрения. Однако, стоит отметить, что хорошая изолированность указанных объектов от вышележащих толщ, является благоприятным фактором для захоронения в них газообразных продуктов, в частности углекислого газа (в рамках мероприятий по снижению карбоновых выбросов) (Риази Масуд и др., 2024). К плюсам можно отнести и минимальное экологическое влияние применения здесь методов повышения приемистости, в частности гидроразрыва пласта (Hsu-Peng Loh, Nancy Loh, 2016).

Верхнедевонско-турнейский карбонатный НГК охватывает стратиграфический интервал от саргаевского (франский ярус верхнего девона) до кизеловского (турнейский ярус нижнего карбона) горизонта. Для верхнедевонской части комплекса характерны отложения доманиковых фаций толщиной до 100 м и рифогенные образования толщиной до 550 м, предопределившие формирование Камско-Кинельской системы прогибов.

Саргаевские и доманиковые отложения среднефранского подъяруса, согласно залегающие на тиманских маломощных известняках, представлены крепкими глинистыми битуминозными известняками с прослоями кремней и битуминозных сланцев. Суммарная мощность отложений 11–20 м. Нерасчлененные верхнефранские отложения (мендымский, воронежский, евлановский, ливенский горизонты) представлены депрессионными фациями и сложены битуминозными известняками, доломитизированными, в разной степени окремнелыми, с прослоями аргиллитов общей мощностью до 55 м.

Суммарная мощность франских отложений изменяется от 160 м до 379 м в районе Уньвинского рифогенного массива, где верхнефранские отложения сложены рифогенными массивными известняками. Диапазон изменения пористости по ГИС от 4,3 до 16,5%.

Фаменский ярус сложен рифогенными известняками, неравномерно доломитизированными, окремнелыми, с прослоями битуминозных сланцев, доломитов, кремней, с многочисленными кавернами и трещинами. Мощность отложений изменяется от 50–110 м в депрессионной части до 183–250 м в районах развития рифовых массивов. Пласты-коллекторы представлены преимущественно известняками. Эффективная толщина фаменских отложений изменяется от 6,2 м до 51,4 м. Средневзвешенное значение пористости – 6,8% при диапазоне изменения от 3,5 до 12,1%.

Следует отметить, что имеется положительный опыт размещения попутных вод в рифогенных фациях на Чашкинском, Гагаринском, Уньвинском, Шершнёвском, им.Архангельского газонефтяных месторождениях (Яковлев, 1997, 2004; Kostarev et al., 2023). В частности, пробные закачки на Уньвинском месторождении, показали, что приемистость данных отложений может превышать 1000 м³/сут. Значительные эффективные толщины коллектора (до сотен метров) и трещинно-каверновая структура пустотного пространства позволяют планировать в них размещение весьма существенных объемов стоков (300–350 тыс м³/год/скв.). Поскольку залежи нефти локализованы, как правило, в кровельной части свода рифогенного массива (высота залежей 50–90 метров), создаются предпосылки для безопасного использования нижележащих карбонатных толщ в качестве резервуара для захоронения избыточных рассолов калийного производства при условии получения соответствующей лицензии.

К условно неблагоприятным факторам можно отнести ограничение полезного объема рифогенного массива его геометрическими размерами, поскольку в кровле и основании формации залегают слабопроницаемые породы. Кроме того, для обеспечения промышленных объемов закачки, с учетом ежегодного образования рассолов, требуется использование нескольких поглощающих скважин и создание соответствующей инфраструктуры (трубопроводы, насосные станции, системы контроля).

Турнейские отложения на большей части территории представляют собой клиноформные образования, сложенные слоистыми карбонатными (зернистые известняки) и карбонатно-глинистыми породами (глинистые известняки, аргиллиты). Мощность отложений в депрессионной зоне достигает 250–320 м. На склонах структур турнейские отложения сложены крепкими известняками, участками кавернозными, прослоями глинистыми, мощностью 60 м и более. На территории Сибирского месторождения и им.Архангельского турнейские отложения плотные, на Уньвинском месторождении эффективная толщина изменяется от 0,4 до 3,3 м. Средневзвешенное значение пористости по ГИС равно 7,0% диапазон изменения от 4,7 до 10,8%. Учитывая приведенные характеристики, рассматривать отложения турнейского яруса для размещения стоков не рационально.

Нижне-средневизейский терригенный НГК охватывает стратиграфический интервал терригенных отложений визейского яруса от радаевского до тульского горизонта.

Мощность терригенной толщи изменяется от 32 м (скв.79 Белопашиная) до 69 м (скв. 441/1 Нижнебалахонцевская). Увеличение мощности объясняется присутствием в разрезе скважины 441/1 Нижнебалахонцевская бобриковских песчаников большей мощности, чем в сопоставляемых разрезах. Мощность яруса изменяется от 167 м (скв. 441/1 Нижнебалахонцевская) до 241 м (скв.44 Сибирская).

Радаевский горизонт сложен переслаиванием аргиллитов, прослоями битуминозных, известковистых, алевролитов и мелкозернистых глинистых песчаников. Толщина отложений радаевского горизонта колеблется от 4 до 23 м, и характеризуется низкими коллекторскими свойствами.

В бобриковском горизонте терригенные коллекторы сложены в основном песчаниками мелкозернистыми, реже средне- и крупнозернистыми с подчиненными прослоями аргиллитов и алевролитов. В разрезах скважин выделяется от одного до трех проницаемых прослоев толщиной от 0,5 до 22,7 м. Эффективная толщина бобриковских отложений изменяется от 3,2 м до 34,5 м при мощности горизонта 7,5–37,4 м. Средневзвешенное значение пористости пластов-коллекторов составляет 15,7% при диапазоне изменения от 12,0 до 18,1%.

Тульские терригенные отложения мощностью 15,6–26,3 м имеют аргиллито-алевролитовый состав при подчиненной роли песчаников. Пористость проницаемых разностей колеблется в интервале 7,3–10,7%, проницаемость в среднем составляет 4,02 мД.

Следует констатировать, что так же, как и описанная выше девонская, визейская терригенная толща не обладает характеристиками, необходимыми для эффективного использования в качестве эксплуатационного объекта закачки.

Визейско-башкирский карбонатный НГК выделен в составе верхневизейского подъяруса, серпуховского и башкирского ярусов.

Верхневизейский подъярус включает верхнюю часть тульского, алексинский, михайловский, веневский горизонты и сложен преимущественно органогенно-детритовыми глинистыми доломитизированными известняками и доломитами. Эффективная толщина изменяется от 3,6 м до 11,9 м при толщине подъяруса 130–204 м. Средневзвешенное значение пористости пластов-коллекторов по ГИС составляет 7,3%, изменяясь от 6 до 13,6%. Проницаемость колеблется в диапазоне 0,1–5,6 мД.

Разрез серпуховского яруса представлен известняками и доломитами, местами известковистыми. Плотная часть разреза сложена преимущественно детритово-биоморфными, детритово-сугликовыми и детритово-комковатыми известняками, реже известняковыми раковинными песчаниками и другими типами известняков. Породы в редких случаях доломитизированные и кавернозные. Пласты-коллекторы сложены в большинстве случаев детритово-биоморфными, детритово-сугликовыми и детритово-комковатыми известняками, в меньшей степени – известняками других типов, в том числе известняковыми раковинными песчаниками и оолитовыми

известняками. Известняки участками доломитизированные, кавернозные. Эффективная толщина отложений изменяется от 5,8 м до 34,6 м при толщине яруса около 100 м. Средневзвешенное значение пористости по ГИС составляет 12,0%, диапазон изменения от 6,0 до 17,0%.

Башкирские отложения представлены карбонатными породами, преимущественно известняками, реже доломитами. Эффективные толщины изменяются от 4,0 м до 12,2 м при толщине яруса 33–84 м. Средневзвешенное значение пористости по ГИС составляет 11,2%, диапазон изменения от 5,6 до 12,9%.

Попытки использования отложений комплекса для закачки подтоварных вод на Логовском и Озерном месторождениях оказались малоэффективными, в силу невысоких ФЕС и, соответственно, низкой водопроницаемости (Яковлев, 1997).

Верейский терригенно-карбонатный НГК представлен известняками, аргиллитами, редкими маломощными прослоями доломитов и алевролитов. Очень редко встречаются прослойки мергеля. Среди известняков преобладают органогенные, реже микрокристаллические, встречаются известняки неравномерно-глинистые и алевроитистые, иногда доломитизированные.

Общая толщина пласта изменяется от 56,4 до 68,9 м. Маломощные проницаемые прослои не выдержаны по площади и часто бывают замещены плотными разностями. Средневзвешенное значение пористости по ГИС составляет 12,8%, диапазон изменения от 7,3% до 20,1%.

Каширско-гжельский карбонатный НГК сложен известняками и доломитами, с преобладанием известняков. Известняки плотные в отдельных участках доломитизированные, сульфатизированные. Доломиты известковистые, иногда слабо глинистые. Терригенные прослои приурочены к нижней части горизонта.

Общая толщина каширского горизонта изменяется от 29,4 м до 77,5 м. Эффективная толщина проницаемых прослоев изменяется от 0,8 до 1,8 м. Отмечается невыдержанность проницаемых слоев. Средневзвешенное значение пористости по ГИС равно 18,8%, диапазон изменения – от 9,5% до 24,0%.

Отложения подольского и мячковского горизонтов представлены известняками и доломитами в равных соотношениях. В виде очень тонких прослоев встречаются аргиллиты. Особенностью известняков подольского горизонта являются редкие включения, а иногда и целые линзы кремня. Толщина подольско-мячковских отложений изменяется от 150 до 200 м. Коллекторские свойства невысокие в большинстве скважин пласт плотный.

Верейский и каширо-гжельский комплексы при относительно неплохих коллекторских свойствах, характеризуются значительной неоднородностью и небольшими эффективными толщинами, что не позволяет рассматривать их в качестве эффективного эксплуатационного объекта размещения стоков.

Преимущественно карбонатные отложения нижепермского НГК залегают на глубинах около 850 м, перекрыты сверху иренским региональным флюидоупором и ограничены снизу мячковским водоупором.

Общая толщина ассельско-сакмарских отложений изменяется от 319 м (Сибирское месторождение) до 360 м (Шершнёвское месторождение).

Верхне-сакмарские отложения представлены карбонатами с вероятным развитием карстового субэндогенного типа геофильтрационных сред. По разрезу толщи вскрыты немногочисленные водонасыщенные пласты небольшой мощности (суммарно 4–9 м). Средневзвешенное значение пористости по ГИС равно 13,3%, диапазон изменения от 9,3% до 16,3%. Проницаемость в среднем составляет 0,003 мкм².

Подстилаящая толща включает нижнюю часть сакмарских и ассельских карбонатных отложений. При достаточно большой общей толщине, эффективная составляющая не превышает 4 м. По результатам интерпретации материалов ГИС коэффициент пористости водонасыщенных пропластков обычно не превышает 11%, а коэффициент проницаемости – 0,002 мкм², однако в пределах Шершнёвского месторождения эти параметры достигают значений 16,3% и 0,034 мкм², соответственно.

Породы артинского возраста представлены известняками и доломитами светло-серыми и серыми, неравномерно глинистыми, часто окремнелыми. В средней части разреза артинского яруса отдельными скважинами вскрыты рифогенные отложения, представленные доломитами реликтово-органогенными и известняками органогенными, массивными. Общая толщина яруса по данным ГИС изменяется от 210,6 до 254 м, а эффективная – от 78,6 до 82 м.

Артинские органогенные постройки выявлены, в основном, по материалам сейсморазведки, на всей рассматриваемой территории и представлены разноразмерными образованиями изометричной, чаще овальной формы, имеющими различную пространственную ориентацию. Их размеры колеблются от 0,7–0,9 км до 3,5–5,0 км в поперечнике, амплитуда колеблется от 5 до 106 м. Толщина карбонатно-органогенных осадков, подтвержденных бурением, изменяется от 10 м до 82 м (Яковлев, 1997, 2004). Интерпретация ГИС показала, что средняя пористость эффективных прослоев изменяется от 9,2 до 16,3%, в среднем составляя 10,3%, средняя проницаемость – 0,007 мкм².

Нижепермские карбонатные отложения могут рассматриваться в качестве дополнительного объекта размещения. При сходных с верхнедевонско-турнейской толщей положительных характеристиках (и те, и другие представлены рифогенными образованиями с большими эффективными толщинами и неплохими ФЕС) и даже меньших глубинах залегания, следует все-таки отметить более низкую степень «попадания» скважин непосредственно в тело рифа, что в первую очередь связано с несоответствием структурных планов позднедевонско-среднекаменноугольных и нижепермских тектонических форм. Кроме того, пробные закачки в артинские рифогенные постройки выявили довольно локальное развитие высокопроницаемых участков и слабую гидродинамическую связь с зарифовой зоной (Потапов, 2016).

Совместимость вод

Совместимость закачиваемых стоков с водами, содержащимися в пласте, является не менее важным фактором, чем геометрические размеры эксплуатационного объекта и его фильтрационно-емкостные характеристики. Взаимодействие указанных флюидов в силу химических реакций или физических процессов не должно приводить к образованию минеральных осадков.

Поскольку попутно добываемые с нефтью воды являются собственно пластовыми, их совместимость не ставится под сомнение. В данном случае требуется лишь приведение параметров подтоварных вод к необходимым значениям (Keister, 2010). Рассолы, получаемые в результате переработки солей, при довольно близком минеральном составе все же имеют определенные особенности, то есть возможность их закачки должна быть подтверждена соответствующими исследованиями (Bachu Stefan et al., 1988; Roy et al., 1989).

В природных водах могут выпадать две основные группы осадков. Первая – кальций и магний, содержащие соединения (кальциты, доломиты, гипсы, галиты и т.д.), склонность к выпадению которых определяется такими гидрогеохимическими параметрами воды, как pH, содержание HCO_3^- , CO_3^{2-} . Вторая группа осадков связана с окислительно-восстановительными процессами образования различных форм сульфидов (пириты и пр.) и различных гидроксо-форм железа. Влияние оказывает окислительно-восстановительная обстановка: наличие растворенного H_2S и/или растворенного кислорода; в целом окислительно-восстановительная обстановка характеризуется величиной редокс-потенциала воды (Eh) (Keely, 1982).

Данные об исследованиях совместимости вод, к сожалению, охватывают не все рассмотренные выше нефтегазоводоносные комплексы. Тем не менее, по результатам моделирования составов смеси пластовых вод различных НГК и рассолов установлены определенные закономерности.

Оценка совместимости пластовых вод визейского терригенного НГК показала, что при добавлении рассолов (насыщенных кальцитом, доломитом и галитом) не происходит образования гипса и галита, но возможно образование карбонатных осадков (особенно, доломита и кальцита) при доле закачиваемого рассола более 40%. Однако количество образующегося осадка крайне мало (не более 0,007 г/кг смеси). При доле рассола более 80% возможное осадкообразование кальцита и доломита не превышает 0,003 г/кг смеси. Учитывая непосредственное соседство этого комплекса с верхнедевонско-турнейским НГК, стоит предполагать близость характеристик пластовых вод этих толщ.

В отношении башкирско-серпуховского объекта расчетный прогноз весьма неоптимистичен: рассолы фактически непригодны для закачки, особенно в малоемкий коллектор. Пластовые воды при нормальных условиях (25 °C, 1 атм) являются пересыщенными кальцитом и доломитом и ненасыщенными в отношении гипса и галита. При смешении с рассолами при невысоких давлениях, возможно образование кальцита и доломита. При этом в смеси рассола при любой температуре вне зависимости от давления в осадок возможно выпадение сульфатных минералов (гипс). При доле рассола более 50% в осадок выпадает галит, содержание которого возрастает по мере увеличения доли рассола и величины его минерализации. То есть, при закачке рассола в пласт вероятно выпадение осадка во всем контуре распространения закачиваемых рассолов и, следовательно, падение приемистости скважины.

При закачке избыточных рассолов в поглощающие горизонты нижнепермских карбонатных отложений растворы совместимы, выпадение сульфата кальция не прогнозируется.

Заключение

Проведенное исследование показало, что проблема размещения промышленных стоков в условиях одновременной разработки калийных и нефтяных месторождений в Соликамской депрессии весьма актуальна и требует комплексного решения.

С точки зрения недропользования, несмотря на схожесть составов и свойств стоков, их подземное размещение предусматривает наличие самостоятельных лицензий. Захоронение стоков нефтедобычи возможно в рамках существующего лицензионного участка в соответствии с технологическими документами на разработку месторождения. Для размещения рассолов калийного производства в подсолевых горизонтах необходимо оформление отдельной лицензии на геологическое изучение и эксплуатацию подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых.

Размещение подтоварных вод и рассолов в надсолевых горизонтах связано с серьезными рисками, включая возможное загрязнение пресных водоносных слоев и негативное воздействие на соленосные толщи. В качестве альтернативы рассмотрены подсолевые водоносные комплексы с точки зрения обладания достаточной емкостью, удовлетворительными фильтрационно-емкостными свойствами и надежной гидродинамической изоляцией.

Наибольший потенциал для закачки стоков установлен для рифогенных карбонатных толщ франского и фаменского ярусов, демонстрирующих высокую приемистость и значительные эффективные толщины. Дополнительным резервом могут служить нижнепермские карбонатные отложения, хотя их неоднородность и локальная проницаемость ограничивают масштабы применения.

Для обеспечения промышленных объемов закачки потребуется строительство соответствующей инфраструктуры. Стоит отметить, что бурение новых поглощающих скважин экономически невыгодно, а в ряде случаев невозможно. Наиболее рациональным решением представляется использование законсервированных или неэксплуатируемых нефтяных скважин, расположенных в краевых частях месторождений. Это позволит снизить капитальные затраты и минимизировать экологические риски.

Метод глубинного захоронения промышленных стоков продолжает оставаться оптимальным решением с точки зрения экологии, обеспечивая надежную изоляцию вредных веществ от поверхностных экосистем. Для успешной реализации системы размещения стоков в условиях Соликамской депрессии важное значение приобретает комплексный подход, включающий как научные изыскания, так и практические инженерные разработки. Для его реализации необходимо проведение детальных исследований геологического строения и гидрогеологических особенностей территории, создание специализированных технологических решений, учитывающих специфику региона, тщательный подбор эксплуатационных объектов, сочетающий экономическую эффективность и экологическую безопасность.

Финансирование/Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ проект FSNF-2025-0011.

Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания и предложения, которые способствовали улучшению работы.

Литература

- Бахтин В.В., Липницкий В.К., Михайлов Г.К., Ваганов А.А. (1985). О Перспективах сброса рассолов калийных предприятий в подземные горизонты Верхнекамского района. В сб.: *Охрана геологической среды на калийных месторождениях*. Л.: Недра, с. 130–146.
- Богатырева О.А. (1980). К оценке перспектив подземного захоронения промстоков в карбонатные комплексы Соликамской впадины (район Соликамско-Березниковского промузла). В кн.: *Прогноз состояния и управление качеством окружающей среды в районах промышленных узлов*. Пермь, с. 56–63.
- Быков В.Н., Полинская Р.Е. (1967). О возможности сброса сточных вод нефтепромыслов Пермской области в поглощающие скважины. В сб.: *Сбор, транспорт и подготовка нефти. Тр. ПФ Гипровостокнефть*, 3, с. 117–130.
- Гаев А.Я. (1978). Промышленные стоки в подземные горизонты. Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 108 с.
- Гольдберг В.М. (1968). Подземное захоронение промстоков химической промышленности. М.: ВСЕГИНГЕО, 162 с.
- Зуева А.С., Зуев А.С., Толкачев Г.М. (1983). К вопросу захоронения рассолов калийной промышленности на территории Соликамской впадины. В сб.: *Геология, поиски и разведка горючих полезных ископаемых*. Пермь: ППИ, с. 110–118.
- Зуева А.С. (1988). Геологическое строение поглощающих горизонтов визейско-башкирских отложений Соликамской впадины. В сб.: *Геология нефтяных и газовых месторождений, их поиски и разведка*. Пермь: ППИ, с. 117–125.
- Зуева А.С. (1990). О мощности калийных солей в связи со структурным положением подсолесовых горизонтов. Условия образования месторождений калийных солей. Новосибирск: Наука, СО АН СССР, 192 с.
- Кадыров О.Р. (2017). Принципы наилучших доступных технологий применительно к глубинной закачке избыточных рассолов. *Химическая техника*, 3, с. 36–41.
- Константинова С.А. (2001). Проблемы геодинамической безопасности недр и земной поверхности на территории Верхнекамского месторождения калийных и калийно-магниевого солей. *Безопасность труда в промышленности*, 4, с. 45–47.
- Лядова Н.А., Яковлев Ю.А., Распопов А.В. (2010). Геология и разработка нефтяных месторождений Пермского края. М.: «ВНИИОЭНГ», 335 с.
- Покровский В.А. Смирнова М.Я. Полинская Р.Е. (1971). Опыт закачки и сброса сточных вод в продуктивные и поглощающие пласты на промыслах Пермской области. В сб.: *Геология и разработка нефтяных месторождений. Тр. ПермНИПИнефть*, 6, с. 222–232.
- Потапов А.А. (2016). Региональная численная геофильтрационная модель южной части Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7*, 3, с. 4–23.
- Риази Масуд, Илюшин П.Ю., Балдина Т.Р., Санникова Н.С., Козлов А.В., Равелев К.А. (2024). Анализ оценки перспективности захоронения CO₂ в неизученных водоносных комплексах на примере объекта Пермского края. *Записки Горного института*, 270, с. 931–940.
- Шестов И.Н., Шурубов А.В. (1975). Геолого-гидрогеологические условия захоронения промстоков в палеозойские отложения на территории Пермской области. В сб.: *Вопросы подземного захоронения промышленных стоков в глубокие поглощающие горизонты Приуралья. Труды ППИ*, 169, с. 159–167.
- Яковлев Ю.А. (1995). О выборе эксплуатационных горизонтов для подземного захоронения стоков на нефтяных месторождениях. *Современные проблемы геологии Западного Урала. Тезисы докл. науч. конф.*, Пермь, с. 82–87.
- Яковлев Ю.А. (1997). Геофильтрационная схематизация и особенности гидродинамического прогноза закачки стоков в локальный рифогенный массив. В сб.: *Гидрогеология и карстоведение*, 12, с. 72–83.
- Яковлев Ю.А., Шардаков В.А. (1999). Критерии гидрогеологического обоснования глубокого подземного захоронения нефтепромысловых стоков в Пермском Приуралье В сб.: *Геология, разработка, бурение и эксплуатация нефтяных месторождений Пермского Прикамья*, 2, с. 228–234.
- Яковлев Ю.А. (2004). Палеокарстовые геофильтрационные среды – эксплуатационные объекты закачки нефтепромысловых стоков. *Карстоведение XXI век: теоретическое и практическое значение. Материалы международного симпозиума*. Пермь, с. 158–163.
- Яковлев Ю.А., Башкова С.Е. (2018). Гидрогеологические условия додевонских отложений в северо-восточных районах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции и сопредельных территориях. *Нефть Газ Экспозиция*, 2(62), с. 11–16.
- Яковлев Ю.А. (2023). Газонефтеводоносные комплексы Среднего Предуралья. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 216 с.
- Arthur, D., Bohm, B., Bobb, P., Coughlin, J. (2010). Summary of environmental issues, mitigation strategies, and regulatory challenges associated with shale gas development in the United States and applicability to development and operations in Canada. *Canadian Unconventional Resources an International Petroleum Conference*, Calgary, Alberta, Canada, pp. 78–81. <https://doi.org/10.2118/138977-MS>
- Aust H., Kreyssing K. (1985). Hydrological principles for the deep-well disposal of liq-uid wastes fnd wasterwater. Hannover, pp. 423–429.
- Bachu Stefan, Perkins Ernie, Sauveplane Caude M., Hitchon Brian (1988). Modelling of flow and geochemical processes related to subsurface injection of liquid wastes in the Cold Lake Area, Alberta (Canada). Doc. BRGM, N160, pp. 49–61.
- Clark E., Bonura J.D.K., Van Voorhees R.F. (2005). An overview of injection well history in the United States of America. *Underground Injection Science and Technology*. Berkeley National Laboratory, USA, ELSEVIER, 42 p. [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(05\)52001-X](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(05)52001-X)
- Hayes T., Arthur D. (2004). Overview of emerging produced water treatment technologies. *The 11th Annual International Petroleum Environmental Conference*, Albuquerque, NM, pp. 535–541.
- Hsu-Peng Loh, Nancy Loh. (2016). Hydraulic fracturing and shale gas: Environmental and health impacts. *Advances in water resources management*, pp. 293–337. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22924-9_4
- Igunnu E., Chen G. (2012). Produced water treatment technologies. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, pp. 1–21.
- Keely Joseph F (1982). Chemical time-series sampling. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 2(4), pp. 29–38. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1982.tb00843.x>
- Keister T. Marcellus (2010). Hydrofracture flowback and produced wastewater treatment, recycle, and disposal technology. The Science of Marcellus Shale, hosted by Lycoming College in Williamsport, PA, pp. 55–59.
- Kostarev S.M., Yakovlev Yu.A., Shatov V.A., Yakovlev M.Yu., Yakovlev A.Y., Kostarev G.S. (2023). Disposition of Industrial Effluent in Paleokarst Earth Exterior. Lecture Notes in Net-works and Systems. *Science and Global Challenges of the 21st Century – Innovations and Technologies in Interdisciplinary Applications*, pp. 302–317. DOI: 10.1007/978-3-031-28086-3
- Lehr Gay H. (1986). Underground injection: a positive advocate. *Ground Water Rev.*, 6(3), pp. 4–6. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1986.tb00943.x>
- Mantell M. (2011). Produced water reuse and recycling challenges and opportunities across major shale plays. Chesapeake Energy Corporation. *EPA Hydraulic Fracturing Study Technical Workshop Water Resources Management*, March 29–30, N4, pp. 35–39.
- Nazih K Shammass, Charles W Sever, Lawrence K Wang (2009). Deep-well injection for waste management. *Advanced biological treatment processes*, pp. 521–582. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-170-7_14
- Roy W.R., Mravik S.C., Krapac L.G., Dickerson D.R., Guffin R.A. (1989). Geochemical interactions of hasardous wastes with geological in deep-well systems. *Environ. Geol. Nones. III. State Geol. Surv.*, N130, pp. 1–52.
- Veil John F. (1997). Offsite oil field waste disposal varies across US. *Oil and Gas J.*, N46, pp. 95–99.

Сведения об авторах

Андрей Николаевич Башков – канд. геол.-минерал. наук, заместитель директора по науке, ООО «Пермская геолого-геофизическая компания»
Россия, 614090, Пермь, ул. Лодыгина, д. 9
e-mail: bashkov41@yandex.ru

Светлана Евгеньевна Башкова – канд. геол.-минерал. наук, доцент, Пермский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 614990, Пермь, ул.Букирева, д. 15
e-mail: sbashkova@mail.ru

Елена Евгеньевна Коженикова – канд. геол.-минерал. наук, доцент, заведующий кафедрой, Пермский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 614990, Пермь, ул.Букирева, д. 15
e-mail: eekozhevnikova@bk.ru

Статья поступила в редакцию 22.05.2025;
Принята к публикации 05.09.2025;
Опубликована 20.12.2025

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

On the Placement of Industrial Effluents in Deeplying Oil and Gas Complexes in the Territory of the Solikamsk Depression (Perm Region, Russia)

A.N. Bashkov¹, S.E. Bashkova², E. E. Kozhevnikova^{2*}

¹Perm Geological and Geophysical Company LLC, Perm, Russian Federation

²Perm State University, Perm, Russian Federation

*Corresponding author: Elena E. Kozhevnikova, e-mail: eekozhevnikova@bk.ru

Abstract. Currently, for enterprises engaged in mineral extraction in the Solikamsk Depression, the issue of disposing of industrial wastewater – including produced water associated with oil extraction and brines generated during the mining and processing of potash salts – is highly relevant. The most environmentally safe method of disposal is considered to be deep-well injection into deep aquifers. The article analyzes the legal aspects of organizing and operating deep-well injection sites, including the use of existing licensed areas and the procedure for obtaining new licenses for injecting industrial wastewater into deep aquifers. Methodological approaches to underground wastewater injection, as well as criteria for selecting suitable injection sites, are outlined. An analysis of the geological structure of sedimentary strata in the northeastern part of the Volga-Ural oil and gas province is conducted, assessing their spatial distribution, filtration-capacity properties, and the compatibility of native groundwater with the injected wastewater. It has been established that the Tournaisian-Famennian carbonate complex is the most promising for industrial wastewater disposal. Applying an integrated approach to evaluating geological and technological factors will help develop effective solutions to reduce the environmental impact on natural systems.

Keywords: oil and gas-bearing complexes, deeplying horizons, industrial effluents, produced water, excess brines, Solikamsk Depression

Acknowledgements

The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project FSNF-2025-0011

Recommended citation: Bashkov A.N., Bashkova S.E., Kozhevnikova E.E. (2025). On the Placement of Industrial Effluents in Deeplying Oil and Gas Complexes in the Territory of the Solikamsk Depression (Perm Region, Russia). *Georesursy = Georesources*, 27(4), pp. 295–305. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.4.17>

References

- Arthur, D., Bohm, B., Bobb, P., Coughlin, J. (2010). Summary of environmental issues, mitigation strategies, and regulatory challenges associated with shale gas development in the United States and applicability to development and operations in Canada. *Canadian Unconventional Resources an International Petroleum Conference*, Calgary, Alberta, Canada, pp. 78–81. <https://doi.org/10.2118/138977-MS>
- Aust H., Kreysing K. (1985). Hydrological principles for the deep-well disposal of liquid wastes and wastewater. Hannover, pp. 423–429.
- Bachu Stefan, Perkins Ernie, Sauveplane Caude M., Hitchon Brian (1988). Modelling of flow and geochemical processes related to subsurface injection of liquid wastes in the Cold Lake Area, Alberta (Canada). *Doc. BRGM*, N160, pp. 49–61.
- Bakhtin V.V., Lipnitsky V.K., Mikhailov G.K., Vaganov A.A. (1985). On the Prospects for Discharging Potash Enterprise Brine Solutions into Underground Horizons of the Verkhnekamsk District. In: *Protection of the Geological Environment at Potash Deposits*. Leningrad: Nedra, pp. 130–146. (In Russ.)
- Bogatyrev O.A. (1980). On Assessing the Prospects for Underground Disposal of Industrial Wastewater in Carbonate Complexes of the Solikamsk Depression (Solikamsk-Bereznikovsky Industrial Hub Area). In: *Forecasting the State and Managing Environmental Quality in Industrial Hub Areas*. Perm, pp. 56–63. (In Russ.)
- Bykov V.N., Polinskaya R.E. (1967). On the Feasibility of Discharging Oil Field Wastewater into Absorption Wells in the Perm Region. *Coll. papers: Collection, transport and preparation of oil. Tr. PF Giprovostokneft*, 3, pp. 117–130. (In Russ.)
- Clark E., Bonura J.D.K., Van Voorhees R.F. (2005). An overview of injection well history in the United States of America. *Underground Injection Science and Technology*. Berkeley National Laboratory, USA, ELSEVIER, 42 p. [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(05\)52001-X](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(05)52001-X)
- Gaev, A. Ya. (1978). Industrial wastewater into underground horizons. Chelyabinsk: South Ural Book Publishing House, 108 p. (In Russ.)
- Goldberg, V. M. (1968). Underground disposal of industrial wastewater from the chemical industry. Moscow: VSEGINGEO, 162 p. (In Russ.)
- Hayes T., Arthur D. (2004). Overview of emerging produced water treatment technologies. *The 11th Annual International Petroleum Environmental Conference*, Albuquerque, NM, pp. 535–541.
- Hsu-Peng Loh, Nancy Loh. (2016). Hydraulic fracturing and shale gas: Environmental and health impacts. *Advances in water resources management*, pp. 293–337. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22924-9_4
- Igunnu E., Chen G. (2012). Produced water treatment technologies. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, pp. 1–21.
- Kadyrov O.R. (2017). Principles of Best Available Techniques (BAT) applied to deep injection of excess brines. *Khimicheskaya tekhnika*, 3, pp. 36–41. (In Russ.)

Keely Joseph F (1982). Chemical time-series sampling. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 2(4), pp. 29–38. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1982.tb00843.x>

Keister T. Marcellus (2010). Hydrofracture flowback and produced wastewater treatment, recycle, and disposal technology. The Science of Marcellus Shale, hosted by Lycoming College in Williamsport, PA, pp. 55–59.

Konstantinova, S.A. (2001). Problems of geodynamic safety of the subsoil and the earth's surface in the territory of the Verkhnekamskoye deposit of potassium and potassium-magnesium salts. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 4, pp. 45–47. (In Russ.)

Kostarev S.M., Yakovlev Yu.A., Shatov V.A., Yakovlev M.Yu., Yakovlev A.Y., Kostarev G.S. (2023). Disposition of Industrial Effluent in Paleokarst Earth Exterior. Lecture Notes in Net-works and Systems. *Science and Global Challenges of the 21st Century – Innovations and Technologies in Interdisciplinary Applications*, pp. 302–317. DOI: 10.1007/978-3-031-28086-3

Lehr Gay H. (1986). Underground injection: a positive advocate. *Ground Water Rev.*, 6(3), pp. 4–6. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1986.tb00943.x>

Lyadova N.A., Yakovlev Yu.A., Raspopov A.V. (2010). Geology and Development of Oil Fields of Perm Krai. Moscow: VNIIOENG, 335 p. (In Russ.)

Mantell M. (2011). Produced water reuse and recycling challenges and opportunities across major shale plays. Chesapeake Energy Corporation. *EPA Hydraulic Fracturing Study Technical Workshop Water Resources Management*, March 29–30, N4, pp. 35–39.

Nazih K Shammass, Charles W Sever, Lawrence K Wang (2009). Deep-well injection for waste management. *Advanced biological treatment processes*, pp. 521–582. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-170-7_14

Pokrovsky V.A., Smirnova M.Ya., Polinskaya R.E. (1971). Experience in Injecting and Discharging Wastewater into Productive and Absorbing Formations at Oil Fields in Perm Oblast. In: *Geology and Development of Oil Fields. Tr. PermNIPIneft*, 6, pp. 222–232. (In Russ.)

Potapov A.A. (2016). Regional Numerical Geofiltration Model of the Southern Part of the Verkhnekamskoye Potassium-Magnesium Salt Deposit. *Bulletin of St. Petersburg University. Ser. 7*, 3, pp. 4–23. (In Russ.)

Masoud R., Ilyushin P.Y., Baldina T.R., Sannikova N.S., Kozlov A.V., Ravelev K.A. (2024). Analysis of the assessment of the prospects for the burial of CO₂ in unexplored aquifer complexes on the example of a facility in the Perm Region. *Journal of Mining Institute*, 270, pp. 931–940.

Roy W.R., Mravik S.C., Krapac L.G., Dickerson D.R., Guffin R.A. (1989). Geochemical interactions of hazardous wastes with geological in deep-well systems. *Environ. Geol. Nones. III. State Geol. Surv.*, N130, pp. 1–52.

Shestov I.N., Shurubor A.V. (1975). Geological and Hydrogeological Conditions of Industrial Wastewater Disposal in Paleozoic Deposits in the Perm Region. In: *Issues of Underground Disposal of Industrial Wastewater in Deep Absorption Horizons of the Cis-Urals. Trudy PPI*, 169, pp. 159–167. (In Russ.)

Veil John F. (1997). Offsite oil field waste disposal varies across US. *Oil and Gas J.*, N46, pp. 95–99.

Yakovlev Yu. A. (1997). Geofiltration Schematics and Features of Hydrodynamic Forecasting of Wastewater Injection into a Local Reef Massif. In: *Hydrogeology and Karst Science*, 12, pp. 72–83. (In Russ.)

Yakovlev Yu. A. (2004). Paleokarst geofiltration environments – operational objects for the injection of oilfield wastewater. Karstology in the 21st century: theoretical and practical significance. *Proceedings of the international symposium*. Perm, pp. 158–163. (In Russ.)

Yakovlev Yu. A. (2023). Gas and oil-water complexes of the Middle Urals. Perm: Perm State National Research University, 216 p. (In Russ.)

Yakovlev Yu. A., Bashkova S. E. (2018). Hydrogeological conditions of pre-Devonian deposits in the northeastern regions of the Volga-Ural oil and gas province and adjacent territories. *Neft' Gaz Ekspozitsiya*, 2(62), pp. 11–16. (In Russ.)

Yakovlev Yu. A., Shadakov V. A. (1999). Criteria for Hydrogeological Justification of Deep Underground Disposal of Oilfield Wastewater in the Perm Urals. In: *Geology, Development, Drilling, and Operation of Oil Fields in the Perm Kama Region*, 2, pp. 228–234. (In Russ.)

Yakovlev Yu.A. (1995). On the Selection of Operational Horizons for Underground Disposal of Wastewater at Oil Fields. *Current Problems in Geology of the Western Urals. Abstracts of the Scientific Conference*, Perm, pp. 82–87. (In Russ.)

Zueva, A. S. (1988). Geological structure of absorbing horizons of the Visean-Bashkirian deposits of the Solikamsk Depression. In: *Geology of oil and gas fields, their prospects and exploration*. Perm: PPI, pp. 117–125. (In Russ.)

Zueva, A. S., Zuev, A. S., Tolkachev, G. M. (1983). On the disposal of brines from the potash industry in the Solikamsk Depression. *Coll. papers: Geology, prospecting and exploration of combustible minerals*. Perm: PPI, pp. 110–118. (In Russ.)

Zueva, A.S. (1990). On the thickness of potassium salts in relation to the structural position of subsalt horizons. Conditions of formation of potassium salt deposits. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 192 p. (In Russ.)

About the Authors

Andrey N. Bashkov – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Deputy Scientific Director, Perm Geological and Geophysical Company LLC

9 Lodygina Str., Perm, 614090, Russian Federation
e-mail: bashkov41@yandex.ru

Svetlana E. Bashkova – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Perm State University
15 Bukirev Str., Perm, 614990, Russian Federation

Elena E. Kozhevnikova – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Head of the Department, Perm State University
15 Bukirev Str., Perm, 614990, Russian Federation

Manuscript received 22 May 2025;

Accepted 5 September 2025; Published 20 December 2025

© 2025 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)