

Оригинальная статья / Original article

УДК 502.175; 502.653

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-1-13



Оценка воздействия подземного размещения жидких отходов на геологическую среду (на примере истощенных газовых месторождений)

Рамиз А. Гасумов¹, Эльдар Р. Гасумов^{2,3}¹Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия²Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджанская Республика³Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджанская Республика

Контактное лицо

Рамиз А. Гасумов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Северо-Кавказский федеральный университет; 355017 Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. Тел. +79624405599

Email r.gasumov@yandex.ruORCID <https://orcid.org/0000-0002-4700-2391>

Формат цитирования

Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Оценка воздействия подземного размещения жидких отходов на геологическую среду (на примере истощенных газовых месторождений) // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 1. С. 145-159. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-1-13

Получена 22 апреля 2024 г.

Прошла рецензирование 27 августа 2024 г.

Принята 15 января 2025 г.

Резюме

Цель: провести исследование и оценить воздействия подземного размещения промышленных стоков и жидких отходов на геологическую среду при их размещении (закачки) в палеоценовый водоносный комплекс в пределах горного отвода на примере истощенного газового месторождения.

Проводились: сбор и обобщения геологических, геофизических и гидрогеологических материалов по изучаемому району, результатов бурения и испытания скважин, проведение замеров пластовых давлений и температур, оценка совместимости жидких отходов с пластовыми водами.

Проводилась оценка воздействия закачки промстоков на гидродинамическую обстановку поглощающего горизонта. Рассчитаны устьевые давления способствующей на гидроразрыв пласта и увеличение пластового давления в нагнетательных скважинах за счет закачки промстоков. Определены радиусы распространения промстоков на конец расчетного периода эксплуатации полигона с учетом уже закачанного объема и снос «пятен загрязнения» под естественным напором пластовых вод за 20 лет. Предложена геологическая модель отклонений от проектных показателей при эксплуатации объекта, рассмотрены варианты, при которых промстоки могут выйти за пределы горного отвода.

Установлено, что по предложенная геологическая модели позволяет предотвратить отклонение от проектных показателей эксплуатации объекта, прогнозировать и предупредить выход размещенных жидких отходов на геологической среде за пределы горного отвода, а воздействие на гидродинамическую систему поглощающего пласта будет незначительно и сосредоточено в основном в пределах допустимого. При эксплуатации полигона необходимо постоянно следить за репрессией на пласт и не допускать ее увеличения выше рекомендованного, несмотря рост пластового давления вследствие закачки жидких отходов будет менее интенсивным, выход промстоков за пределы горного отвода при фактических объемах закачки в поглощающий пласт предложенной толщиной не представляется возможным.

Ключевые слова

Жидкие отходы, палеоценовый водоносный комплекс, подземное размещение, технология закачки.

Assessment of the impact of underground disposal of liquid waste on a geological environment (using the example of depleted gas fields)

Ramiz A. Gasumov¹ and Eldar R. Gasumov^{2,3}

¹North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

²Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan

³Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Principal contact

Ramiz A. Gasumov, Doctor of Technical Sciences, Professor & Head of Department, North Caucasus Federal University; 1 Pushkin St, Stavropol, Russia 355017.
Tel. +79624405599
Email r.gasumov@yandex.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4700-2391>

How to cite this article

Gasumov R.A., Gasumov E.R. Assessment of the impact of underground disposal of liquid waste on a geological environment (using the example of depleted gas fields). *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(1):145-159. (In Russ.)
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-1-13

Received 22 April 2024

Revised 27 August 2024

Accepted 15 January 2025

Abstract

The aim was to conduct a study and evaluate the impact of underground disposal of industrial wastewater and liquid waste on the geological environment when they are placed (injected) into a Paleocene aquifer complex and placed within a mining allotment, using the example of a depleted gas field.

The following were carried out: collection and synthesis of geological, geophysical and hydrogeological materials for the study area; results of drilling and testing of wells; measurements of formation pressures and temperatures; assessment of the compatibility of liquid waste with formation waters.

The impact of industrial waste injection on the hydrodynamic conditions of the absorption horizon was assessed. The wellhead pressures contributing to hydraulic fracturing and the increase in reservoir pressure in injection wells due to the injection of industrial waste were calculated. The radii of distribution of industrial wastewater at the end of the estimated period of operation of the landfill were determined, taking into account the volume already injected and the removal of 'pollution spots' under the natural pressure of formation water over 20 years. A geological model of deviations from design indicators during the operation of the facility has been proposed and options have been considered in which industrial wastewater may go beyond the boundaries of the mining allotment.

It has been established that according to the proposed geological model, it is possible to prevent deviations from the design indicators of the operation of the facility, to predict and prevent the release of disposed liquid waste in the geological environment beyond the boundaries of the mining allotment. The impact on the hydrodynamic system of the absorbent formation is considered to be insignificant and concentrated mainly within the permissible limits. When operating a landfill, it is necessary to constantly monitor the repression on the formation and not allow it to increase above 8.5 MPa. During the operation of the landfill, it is necessary to constantly monitor the repression on the formation and not allow it to increase above the recommended level. Despite the growth of formation pressure due to the injection of liquid waste being less intense, the release of industrial waste beyond the mining allotment with the actual volumes of injection into the absorbing formation of the thickness proposed is not expected to be possible.

Key Words

Liquid waste, Paleocene aquifer complex, underground disposal, injection technology.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке месторождений углеводородов (УВ) и строительстве подземных резервуаров необходимо решить проблему перекачки промышленных сточных вод и жидких отходов в глубокие водоносные горизонты, которые не являются источниками промышленного и бытового использования. В большинстве развитых стран широко развито решение проблем утилизации жидких промышленных отходов при их захоронении в глубоких водоносных горизонтах, содержащих высокоминерализованные грунтовые воды, которые, как правило, не имеют практической ценности [1].

На эксплуатируемых месторождениях УВ и подземных хранилищах газа (ПХГ) на всех этапах их «жизненного цикла», начиная от поиска геологических структур, пригодных для разработки и/или создания подземного резервуара, до их последующей освоения происходит образование промышленных стоков и жидких отходов (ПСЖО) [2].

Подземное захоронение жидких отходов и промышленных стоков, это размещение (производства) в глубокие поглощающие водоносные горизонты земной коры, осуществляется на основании гидрогеологического обоснования и выбора геологической структуры. Для этого в основном используется бывшие пьезометрические и/или приконтурные скважины разрабатываемой углеводородной залежи [3].

Не практикуется закачка через обычные скважины производить захоронение ПСЖО, химически не совместимых с пластовыми водами, так как в результате, которых возможно образование твердый

осадок, закупоривающий поры пласта непосредственно призабойной зоне пласта и провоцирующий снижение проницаемость пласта-коллектора, что имеет важное значение поглощающей залежи. Предупреждение и (или) предотвращения негативных последствий возможно, или за счет специальной химической обработки промстоков, или путем предварительной закачки в пласт буферной нейтральной жидкости, что связано с большими материально-техническими затратами. В связи чем, данная проблема требует геологическое изучение и гидрогеологическое обоснование размещения ПСЖО в стиххруктурах в глубж недра.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе работы проводились: сбор и обобщения геологических, геофизических и гидрогеологических материалов по изучаемому району, результатов бурения и испытания скважин, проведение замеров пластовых давлений и температур, оценка совместимости жидких отходов с пластовыми водами, выбор объектов, пригодных для подземного размещения промышленных стоков и жидких отходов, расчет параметров закачки, выбор способов контроля за надежностью их размещения.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использование способов закачки жидких отходов в геологические структуры должно поддерживать экологическую безопасность и экономический эффект по сравнению с применяемыми физическими, химическими и термическими методами утилизации (рис. 1).

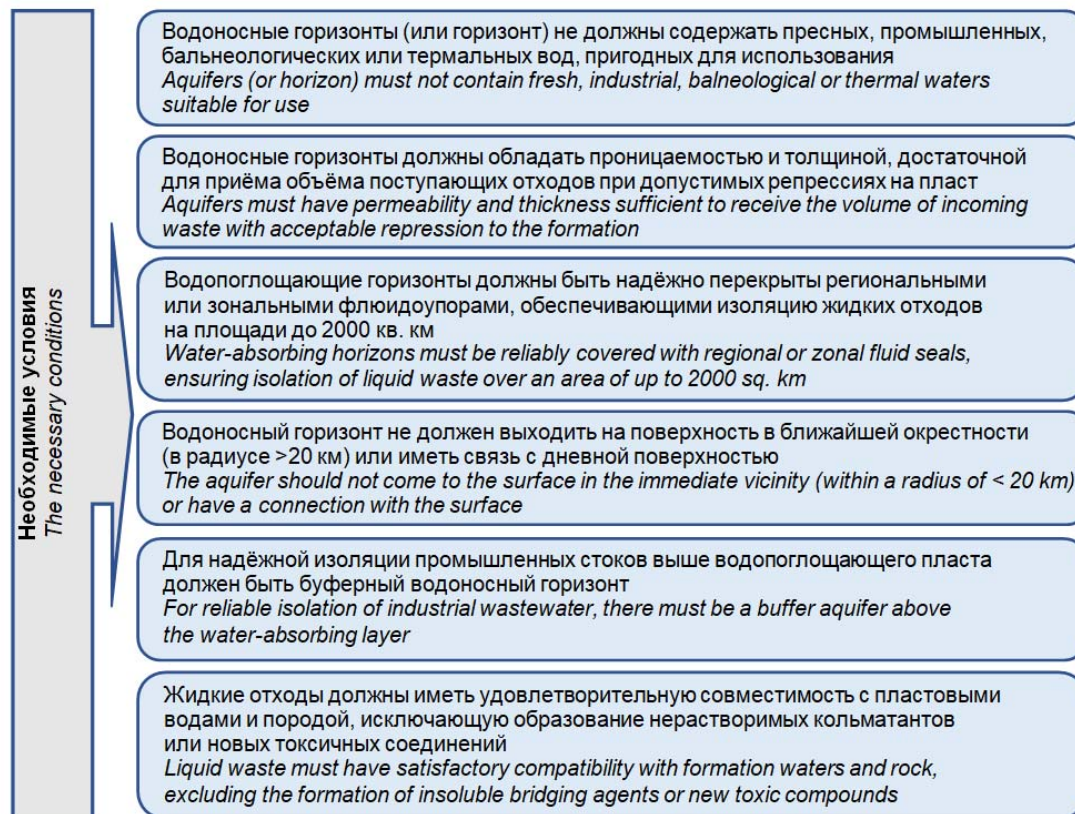


Рисунок 1. Необходимые условия для захоронения промышленных стоков и жидких отходов в водоносных горизонтах

Figure 1. Necessary conditions for storage of industrial wastewater and liquid waste in aquifers

Анализ промысловых материалов показывает, что при выборе метода закачки ПСЖО не всегда соблюдается эти условия (рис. 1) и не учитываются основные факторы размещения их в водоносный комплекс [4]. Рассмотрим данную проблему на примере хадумского горизонта (бывшего Северо-Ставропольского газового месторождения – ССГМ):

- в водах горизонта концентрация йода достигает 40–60 мг/дм³, брома – 95–115 мг/дм³, что позволяет относить их к промышленным, пригодным для извлечения этих компонентов, где область наибольшего содержания йода приурочена к полосе развития зон наиболее проницаемых коллекторов;
- над водоносным горизонтом нет хорошо проницаемых водоносных горизонтов, не имеющих выходов на поверхность в зоне влияния будущего полигона и могущих быть буферными, способными

принять жидкие отходы, в случае непредвиденных аварийных перетоков;

- предположение о том, что жидкие отходы (ЖО) состоят в основном из пластовых вод бывшего газового месторождения, неверно и поэтому исследования их совместимости не проводились; предложенная система подготовки сточных вод к закачке не обеспечивала [5];

- их совместимости (ЖО содержали агрессивные компоненты – CO₂ и H₂S), в анаэробных условиях образовывались сульфиды железа, колющие пласт и трубопроводы).

Изучения данного вопроса показала, что для захоронения промстоков более подходящим является палеоценовые водоносные комплексы бывшего ССГМ (рис. 2).

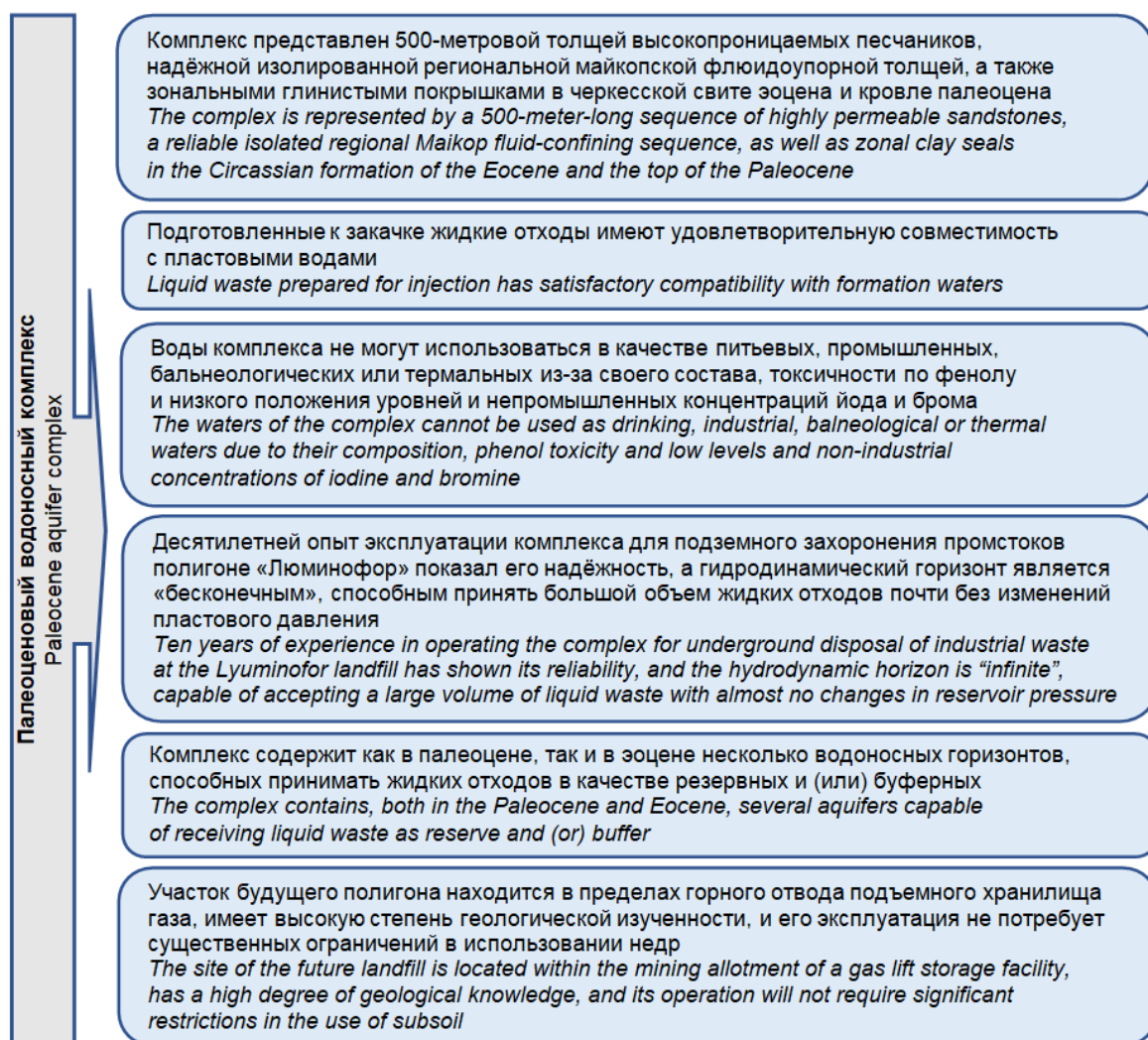


Рисунок 2. Палеоценовый водоносный комплекс для захоронения промышленных стоков и жидких отходов
Figure 2. Paleocene aquifer complex for the disposal of industrial wastewater and liquid waste

Для закачки ПСЖО используется в основном поглощающая скважина, где выбираются несколько геологических объектов, в которых размещаются отходы.

Конструкции скважин должны позволять использование их по результатам пробных гидрогеологических работ (откачка – закачка, оценка совместимости пластовых вод с жидкими отходами) как поглощающие или наблюдаемые, обеспечивающих

подготовку ЖО до удовлетворительной совместимости с пластовыми водами и исключая образование в пласте нерастворимых колюматантов и повышенную коррозию оборудования.

Жидкие отходы (промышленные стоки), это отходы, которые не поддаются биологической очистке из-за повышенного содержания, большой загрязнённости нефтепродуктами и химическими реагентами. Требования к хранению ПСЖО в

геологических структурах направлены, прежде всего, на охрану подземных водоносных горизонтов, вода которых в настоящее время используется для питьевого и хозяйственно-питьевого водоснабжения, а также водоносных горизонтов, содержащих воду, используемую в бальнеологических и промышленных целях. Запрет не распространяется на сброс промышленных сточных вод в глубокие водоёмы [6–8].

Захоронение сточных вод в глубокие горизонты может осуществляться при обоснованной технической невозможности или эколого-экономической нецелесообразности обезвреживания жидких отходов на земле с учетом их совместимости с пластовыми водами и коренными породами пласта (оба этих условия должно быть отражено в заключении специализированной научно-исследовательской организации) (рис. 3).

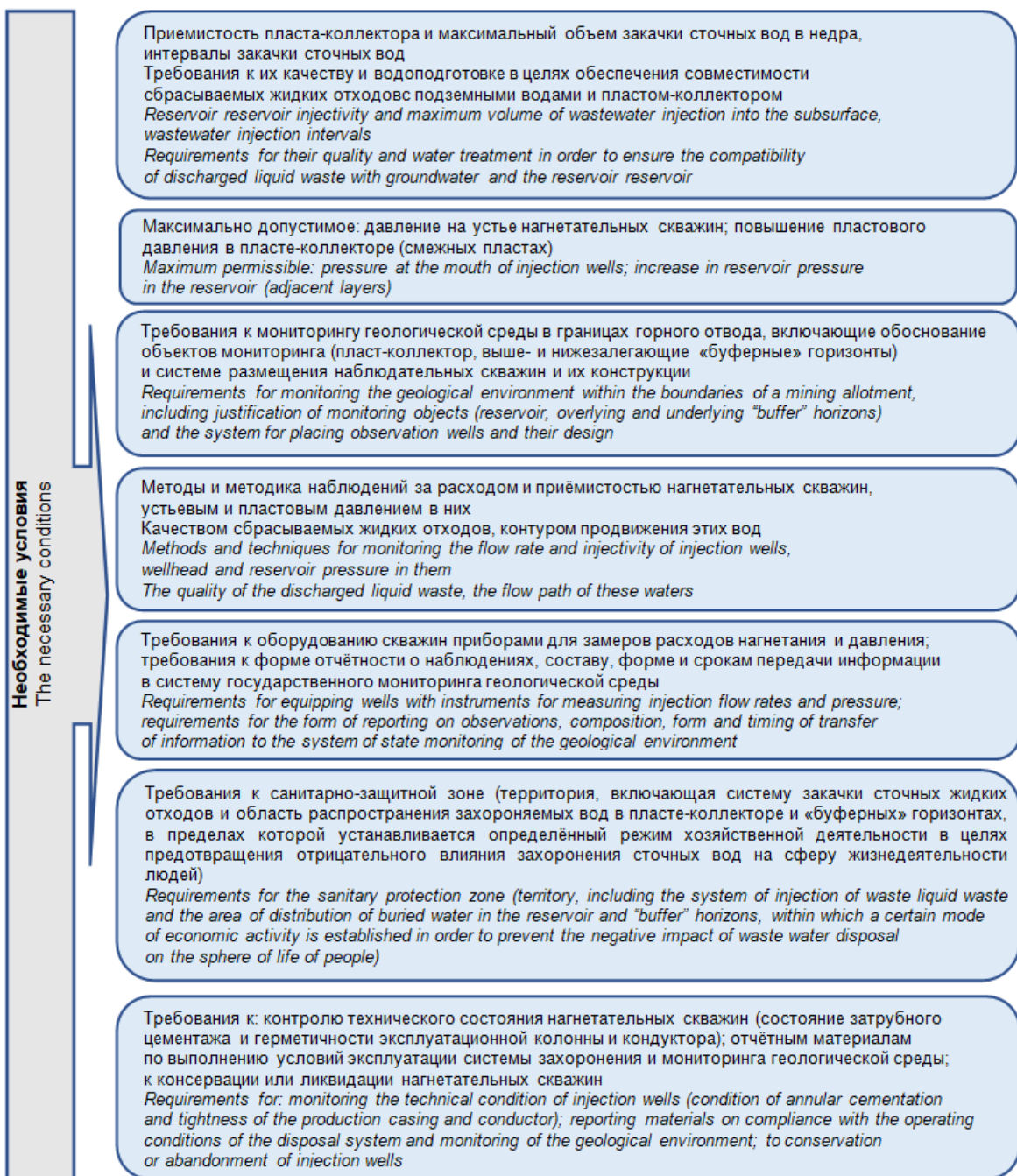


Рисунок 3. Необходимые условия для захоронения промышленных стоков и жидких отходов в геологических структурах

Figure 3. Necessary conditions for the storage of industrial wastewater and liquid waste in geological structures

По мере выработки основных месторождений Юга России, регион из газоснабжающего постепенно становится газопотребляющим и представляет свои территории для хранения и газотранспортировки природного газа в Закавказье и на Северный Кавказ. В качестве ёмкостей для подземного хранения ПСЖО в

бывшем ССГМ возможно использование два пласта-коллектора (рис. 4).

Покрышками для обоих газоносных пластов служат глинистые толщи, мощность которых в верхней части разреза достигает 500 м, где характер газоносной залежи — пластово-сводовый. Граница газоводяного

контакта (по хадумскому горизонту) при максимально-возможном заполнении хранилища практически совпадает с границей горного отвода подземного хранилища газа. Граница газоводяного контакта (по

хадумскому горизонту) при максимально-возможном заполнении хранилища практически совпадает с границей горного отвода подземного резервуара [8–10].

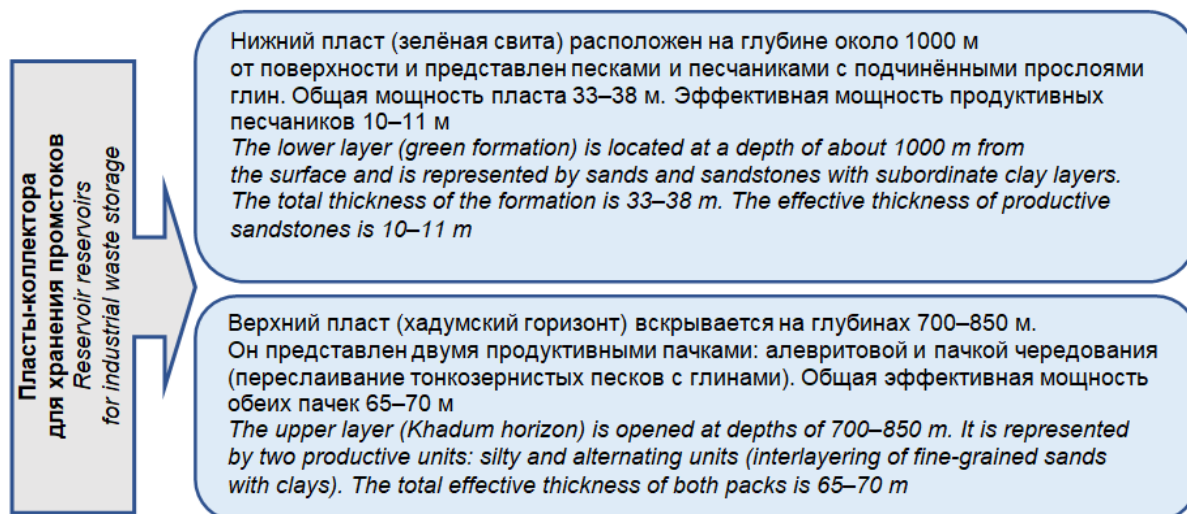


Рисунок 4. Возможные пласты-коллектора для использования в качестве ёмкостей для подземного хранения промстоков

Figure 4. Possible reservoir layers for use as tanks for underground storage of industrial wastes

Подземное хранилище газа – комплекс технических сооружений в пластах геологических структур, предназначенных для закачки, хранения и последующей добычи газа, и включает в себя подземное хранилище, ограниченное горным отводом, фондом скважин различного назначения, сбора газа и технологические комплексы, компрессорный цех, где формируется большое количество ПСЖО различных типов. В подземных хранилищах газа, например, жидкие отходы, состоящие из конденсированной пластовой воды, технической воды для питающих насосов и промывных систем, подаются на локальные очистные сооружения дожимной компрессорной стаеции и после отстаивания подаются под давлением. Вода для закачки в поглощающую скважину на Хадумском горизонте, из которой добывается газ. Максимальный объем перекачиваемых промышленных сточных вод составляет 65 м³/сут. Следует отметить, что состав сточных вод не постоянен, а варьируется по содержанию минерализации, $\text{H}_2\text{S}+\text{HS}^-$, CO_2 , SO_4^{2-} , механические примеси.

Проведённые исследования и расчёты показали, что проектирование и строительство установок биологической очистки стоков от органических компонентов (диэтиленгликоль, метанол, фенолы) перед их закачкой в пласт технологически и экономически не оправдано [11; 12]. Согласно результатам исследований по водоотведению в процессе всего цикла работы подземного хранилища (отбор-закачка) дополнительно расходуется технологическая вода в объеме, примерно равном объему попутных вод. В период цикла закачки газа отводится только отработанная технологическая вода сульфатно-натриевого генетического типа, минерализация 0,45 г/дм³, pH-7,7.

Нижнемеловые отложения (кровля 1785 м) в нижней части представлены плохо проницаемыми песчаниками, залегающими на глубинах 1783–1800 м, и сверху в интервале 1783–1775 м перекрыты маломощными альбскими темно-серыми плотными глинами толщиной 8 м, которые являясь флюидоупором на всей территории Предкавказья, имеют толщину до 200 м и более. Они разделяют верхнемеловые и нижнемеловые водоносные комплексы [13; 14]. Верхнемеловые отложения (известняки) залегают в интервале 1706–1783 м и объем резервуара ограниченный, так как в данном комплексе он представлен трещиноватыми (1725–1735 м) водонасыщенными известняками.

Одним из необходимых условий при выборе геологической структуры о захоронении промстоков в пластах является отсутствие проводящих глубинных разломов. Анализ тектонического строения Северо-Ставропольской геологической структуры показывает, что последний отвечает необходимым условиям изоляции. В радиусе 40 км от него промстоки не будут иметь связи с дневной поверхностью через высокоамплитудные тектонические нарушения. В случае если в районе и имеются малоамплитудные сейсмические нарушения, не обнаруженные сейсморазведкой, то последние не могут служить окнами, так как майкопский и эоценовый региональные флюидоупоры обеспечивают надежную изоляцию высокопластичными глинами.

По гидрогеологическим особенностям в разрезе Центрального Предкавказья выделяются два водоносных этажа: донеогеновый и неогеновый, разделенные мощной толщей майкопских глин, выполняющих роль регионального флюидоупора (рис. 5).

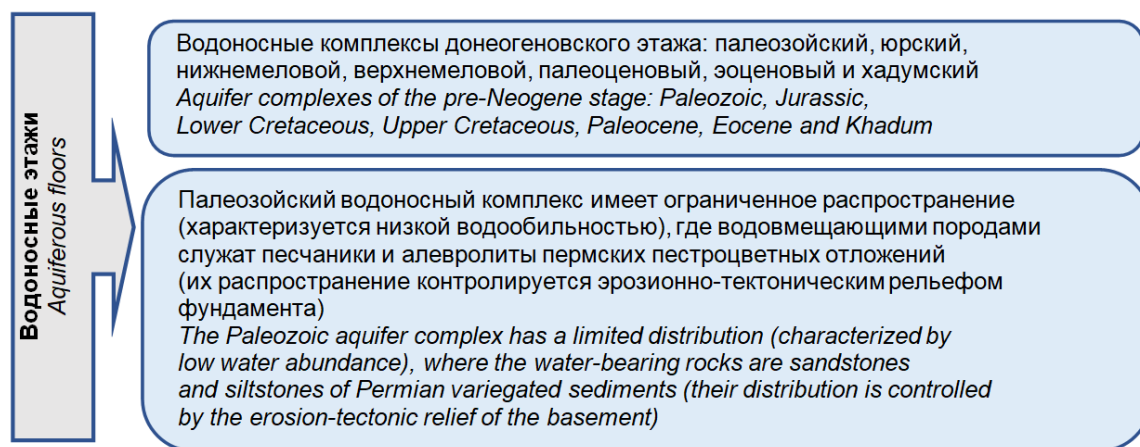


Рисунок 5. Водоносные этажи выделяемые по гидрогеологическим особенностям в разрезе Центрального Предкавказья

Figure 5. Aquifers identified by hydrogeological features in the Central Ciscaucasia section

Нижнемеловой водоносный комплекс распространен повсеместно за исключением отдельных площадей Ставропольского свода, выполняющий роль своеобразной преграды, которую подземные воды обтекают. По гидрохимическим особенностям в комплексе прослеживается четкая зональность. В районах, прилегающих к выходам нижнемеловых отложений, на дневную поверхность распространены слабоминерализованные воды (1–5 г/дм³). По мере фильтрации вод к северу минерализация их закономерно увеличивается, достигая 60–90 г/дм³ в зоне затрудненного водообмена.

Гидрогеологические особенности верхнемеловых пород показывает, что областью питания служит полоса выходов трещиноватых известняков верхнего мела вдоль северного склона Кавказского хребта. В рассматриваемом районе минерализация вод составляет 35–60 г/дм³. Из-за низкой приемистости воды верхнемеловых отложений не могут быть использованы для подземного захоронения жидких отходов. Палеоценовый и эоценовый водоносные комплексы в Центральном Предкавказье представляет уникальный объект из-за значительной толщины песчаных образований хорошей проницаемости. Минерализация вод палеоцен-эоценовых отложений закономерно увеличивается в направлении их движения от 300–500 мг-экв/дм³ на юге до 2000–3000 мг-экв/дм³ на севере (от 9–13 до 60–80 г/дм³). Зона опреснения подземных вод, условно оконтуренная минерализацией 500 мг-экв/л (13 г/дм³), протягивается с юго-запада на север, занимая наиболее приподнятую часть Ставропольского свода. В этой зоне на ряде площадей получены обильные притоки весьма слабо минерализованных вод – (70–150 мг-экв/дм³).

По разрезу палеоценового и эоценового водоносного комплексов с глубиной наблюдается увеличение общей минерализации вод. Химический состав вод зависит от общей минерализации. Для слабо минерализованных вод характерно преобладание щелочей над хлоридами. В водах сильно минерализованных (свыше 1000 мг-экв/дм³) хлориды преобладают над щелочами. Содержание сульфатов обычно 20–30 мг-экв/дм³.

Хадумский водоносный горизонт приурочен к полосообразным песчаным образованиям различной толщины. Между хадумским горизонтом и

палеоценэоценовым комплексом залегают глинисто-мергельные эоценовые отложения, которые обычно выполняют роль водоупорных разделов.

Многочисленные данные по статическим уровням указывают на движение вод в хадумском горизонте с запада-юга-запада на северо-восток. Величины напоров в этом направлении изменяются от 190 до 35 м. Хадумский горизонт повсеместно перекрывается мощной толщей глин майкопа, которая надежно изолирует его от вышележащих водоносных горизонтов неогена. Эти данные по региональной гидрогеологии однозначно указывают на палеоценовый и эоценовый комплексы, как наиболее благоприятные для захоронения ЖО.

Отличительной особенностью караганчокракской залежи является природное аномально низкое пластовое давление. При глубинах залегания 100–280 м давление всего 0,03–0,15 МПа. Статические уровни находятся на отметках +130–140 м. Минерализация вод, как правило, заполняющих до половины толщины пласта – 2–4 г/дм. Они относятся, в основном, к гидрокарбонатно-натриевому типу. Эти отложения выходят на дневную поверхность в зонах развития оползней на Сенгилеевском выступе на расстоянии 20–30 км от создаваемых полигонов. Оползни играют роль своеобразных клапанов, закупоривающих газ во время подвижек. Этот газодляной комплекс очень удобен в качестве индикатора аварийных заколонных перетоков, так как из-за АНПД при заполнении маломощных пластов околоскважинного пространства проток прекратится поступление газа. Воды сарматского водоносного комплекса безнапорные инфильтрационного типа, развиты повсюду, где сохранилась верхняя песчано-известковая серия среднего сармата (глубина уровней достигает 15–25 м). Минерализация вод обычно 0,3–0,8 г/л. Сарматские воды часто используются для местного водоснабжения, поэтому необходим контроль за загрязненностью этого горизонта. При выборе рабочего поглощающего объекта требуется соблюдать определённые условия [15–17]:

- объект должен иметь высокие фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС), способный обеспечить планируемую приемистость нагнетательных скважин;

- объект должен залегать под эксплуатируемыми объектами подземного хранилища изолирован снизу и сверху крышками, сложенными глинами или сильно глинистыми алевролитами, выполняющими роль флюидоупоров;

- по гидродинамическим и гидрохимическим показателям объект должен находиться в зоне застойного режима;

- объект не должен иметь связи с гидродинамической системой подземного хранилища;

- жидкие отходы должны быть совместимы с пластовыми водами и породами рабочего поглощающего объекта;

- выше поглощающего объекта должны находиться резервные объекты и буферные пласты, на которые при кольматации основного объекта возможен возврат, а также проведение мониторинга за возможными вертикальными перетоками жидких отходов;

- поглощающие скважины должны быть расположены в пределах санитарно-защитных зон.

В гидрогеологическом обосновании подземного захоронения промстоков было выделено четыре (I, II, III, IV) объекта для подземного захоронения ЖО. Наиболее перспективным для захоронения жидких отходов рассматривался III объект, аналог полигона «Люминофор», который, как установлено опытно-промышленной эксплуатацией обладает высокой поглощательной способностью до 1800 м/сут. Исходя из результатов анализа, наиболее перспективным поглощающим горизонтом является третий объект палеоцена, на который пробурены нагнетательные и резервные-наблюдательные скважины. Межскважинная корреляция геолого-геофизических разрезов позволила расчленить разрез палеоцена (свита горячего ключа) на пакки. На основании этих данных с учётом ранее пробуренных поисковых и эксплуатационных скважин построены структурные карты

подолы и кровли основного (III) поглощающего объекта, а также кровли буферного (IV) горизонта.

Анализ структурных планов показывает на малые углы падения пластов, составляющие $0^{\circ}30'$. Это позволяет сделать прогноз о том, что смещение «пятна загрязнения» жидких отходов будет происходить незначительно. Исследование показало, что размещаемые в пласт промышленные сточные воды не будут вызывать набухание глинистого компонента пласта, так как его соотношение к сумме катионов в дренаже $(Ca + Mg)/100$ составляет 46,5 %, что на 45,3 % выше этого соотношения в пласте. вода (1,2 %). Поэтому образование солей неорганических соединений при сбросе сточных вод в палеоценовый комплекс непредсказуемо, что подтверждается лабораторными экспериментами. Из-за высокого содержания органических компонентов химическая потребность сточных вод в кислороде превышает 2000 мг $O_2/дм^3$ [5; 16]

Чтобы обеспечить стабильную работу скважин при сохранении способности к закачке, сточные воды необходимо предварительно очищать и доводить до состояния, соответствующего определенным параметрам [5] (рис. 6).

Технологические методы очистки сточных вод включают в себя следующие процессы в зависимости от качественных показателей: нейтрализацию, осаждение, применение ингибиторов коррозии и солеотложений, биоцидов, деаэрацию, осаждение нестабильных компонентов [5].

Набухаемость глинистой составляющей пласта-коллектора сточных вод прогнозируется по соотношению коэффициентов в пластовых (K_{fw}) и сточных водах (K_{ww}).

Набухаемость глин пласта не прогнозируется в том случае, если $K_{ww} \geq K_{fw}$. Оптимальный вариант, когда массовая концентрация концентрации ионов кальция и магния в стоках составляет не менее 10 % от суммы катионов [9; 14].

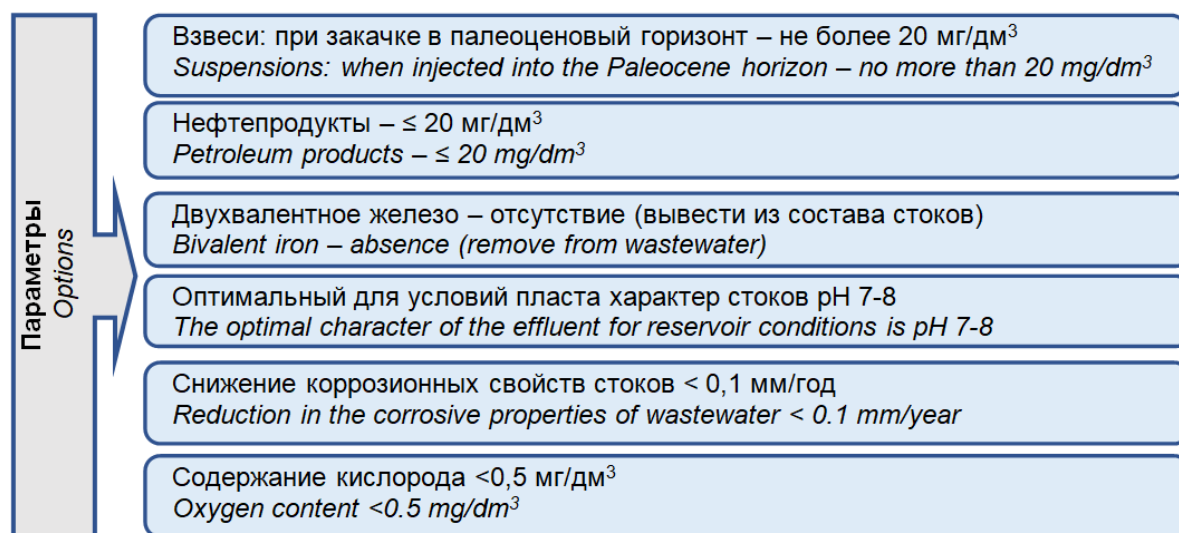


Рисунок 6. Параметры предварительной подготовки жидких стоков к захоронению в водоносных горизонтах

Figure 6. Parameters for the preliminary preparation of liquid wastewater for disposal in aquifers

Совместимость по основным осадкообразователям: карбонатам и сульфатам кальция ($CaCO_3$, $CaSO_4$) является неременным условием при проведении

закачки стоков в глубокопогруженные горизонты. Как известно, количество выпадающего карбонат кальция контролируется карбонатным равновесием,

отражающим соотношением между CO_2 , HCO_3^- и CO_3^{2-} в растворе. Количественные соотношения данных компонентов могут определяться концентрацией ионов водорода (величина pH), которая характеризует условия равновесия между жидкой фазой, с одной стороны, и твердой и газообразной – с другой [3; 13].

На этом основан прогноз возможности осаждения карбоната кальция сравнением фактического pH воды с расчетным значением pH_s при насыщении данной воды карбонатом кальция в интервале температур от 0 до 90 °C. За показатель солеотложения принимают «индекс насыщения» – IS и «индекс стабильности» – ISt:

$$IS = \text{pH} - \text{pH}_s, \quad (1)$$

где pH – экспериментальные данные; pH_s – равновесное насыщение воды карбонатом кальция.

IS позволяет оценить способность смеси отлагать или растворять карбонат кальция, а ISt качественно оценивает солеотложения. Процесс образования гипса в водных системах контролируется присутствием Ca^{2+} , SO_4^{2-} – и других ионов и зависит от дефицита насыщения растворов CaSO_4 , который определяется с помощью расчетных формул и номограмм [14]. Отложений гипса также не прогнозируется: дефицит насыщения смесей составляет 2176, 1963, 1711 мг/дм³, соответственно. Прогноз выпадения сульфатных солей основывается на результатах оценки насыщенности вод непосредственно сульфатом кальция, основанной на теории активности ионов в диапазоне температур от 0 до 90 °C [10; 11].

Породы палеоценового комплекса представлены темно-серыми, квар-цитовидными, слабосцементированными светло-серыми песчаниками с прослоями известковых разностей со средней проницаемостью 0,04 мкм². Допустимое содержание механических примесей в стоках для таких коллекторов 20 мг/дм³, нефти – 20 мг/дм³. Механические примеси – жидких отходов представлены гидроксидом железа;

гидроксидом и сульфидом железа, нерастворимый в соляной кислоте остаток составляет 55,65 %.

Стоки коррозионно-агрессивны, содержание $\text{CO}_{2\text{агр}}$ до 70 мг/дм³, pH – 5,6, содержание Fe_3^{+} – до 6 мг/дм³, Fe_2^{+} – до 150 мг/дм³. Содержание H_2S + HS- в осадке составило до 2,38 мг/дм³. Скорость коррозии (по образцам-свидетелям) при закачке стоков в нагнетательные скважины составлял 0,026–0,18 мм/год.

В анаэробных условиях пласта за счет процессов сульфатредукции (при содержании $\text{Fe}_2^{+} = 150$ мг/дм³) может образоваться осадок сульфида железа (более 240 мг/дм³), кольтирующий пласт (при закачке 200 м³/сут. масса осадка составит 48 кг). Набухаемость глинистой составляющей пород определяется отношением суммы двухвалентных катионов к общей сумме катионов в стоках, в сравнении с таковой в пластовой воде.

Для палеоценового комплекса набухаемость не прогнозируется, так как это отношение в стоках (16 %) и технической воде (56 %) выше, чем в пластовой воде палеоцена. Оценка вероятности выпадения в пласте неорганических солеотложений (сульфатов и карбонатов кальция), определялась лабораторными экспериментами и расчетами. Прогноз осаждения карбонатов кальция проведен с помощью расчетов по методике Стиффа-Девиса [12; 16] (рис. 7).

Возможность отложения гипса в смеси сточной и пластовой вод оценивают по коэффициенту перенасыщения, который зависит от концентрации ионов сульфатов и кальция в смеси вод.

Учитывая, что состав закачиваемых промстоков не постоянен, расчет физических свойств промстоков в пластовых условиях производится для двух участков подземного захоронения по усредненным параметрам. Средняя плотность промстоков по результатам проб из накопительной емкости и жидких отходов после основных технологических процессов составляет 1000 кг/м³. Максимальное значение минерализации по результатам анализов отдельных составляющих промстоков составляет 3,2 г/дм³ [5; 12]

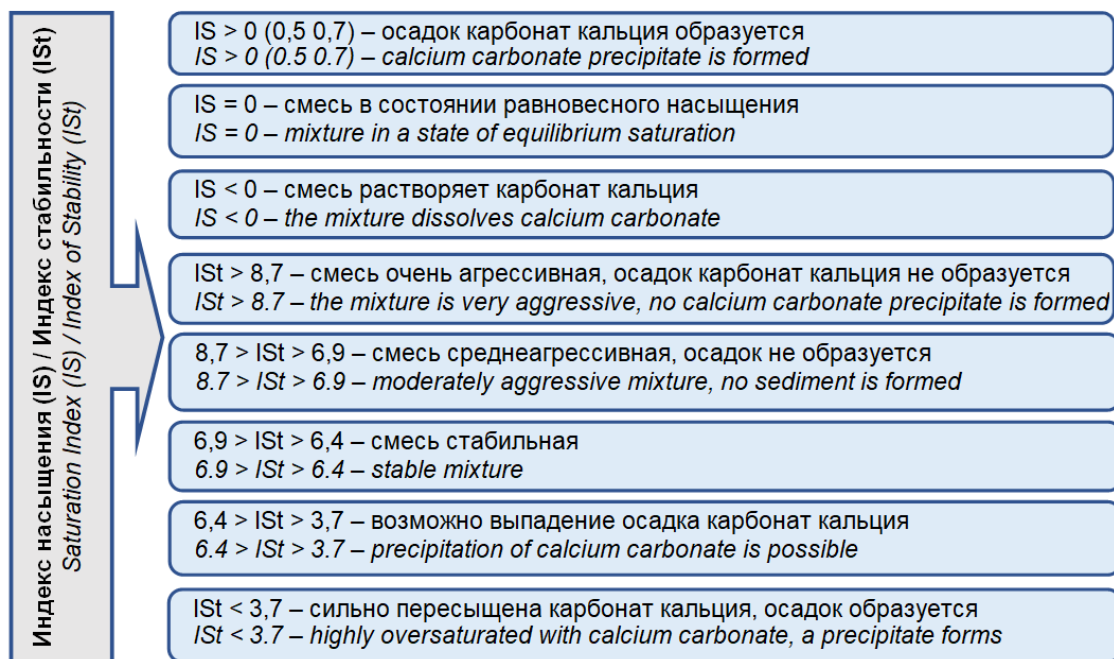


Рисунок 7. Прогноз осаждения карбонатов кальция

Figure 7. Prediction of calcium carbonate precipitation

Коэффициенты сжимаемости и динамической вязкости промстоков в пластовых условиях определены в соответствии с [4; 11]. Расчетные значения динамической

вязкости, коэффициента сжимаемости воды для термобарических условий пласта-приемника представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика физических свойств промстоков в пластовых условиях

Table 1. Characteristics of the physical properties of industrial wastewater in reservoir conditions

Коэффициенты a_0, a_1, a_2, T Odds, a_0, a_1, a_2, T	$\rho_w, \text{кг/м}^3$ $\rho_w, \text{kg/m}^3$	$M, \text{г/л}$ $M, \text{g/l}$	$\beta_f, \text{МПа}^{-1}$ β_f, MPa^{-1}	$t_{rt}, ^\circ\text{C}$ $t_{rt}, ^\circ\text{C}$	a_μ a_μ	$\mu_1, \text{МПа}\cdot\text{с}$ $\mu_1, \text{mPa}\cdot\text{s}$	$\mu_{dv}, \text{МПа}\cdot\text{с}$ $\mu_{dv}, \text{mPa}\cdot\text{s}$
$a_0 = 500$ $a_1 = -2,76$ $a_2 = 0,0306$ $T = 25 ^\circ\text{C}$	1000	3,2	$4,48 \cdot 10^{-4}$	79	$7,15 \cdot 10^{-4}$	0,36	0,363

где, T – пластовая температура начальная, $^\circ\text{C}$; M – минерализация воды, г/л; β_f – коэффициент сжимаемости жидкости, МПа^{-1} ; t_{rt} – пластовая температура, $^\circ\text{C}$; a_μ – коэффициент, влияние минерализации на вязкость воды; μ_1 – коэффициент динамической вязкости дистиллированной воды при заданной температуре, $\text{МПа}\cdot\text{с}$; μ_{dv} – динамическая вязкость, $\text{МПа}\cdot\text{с}$.

Под влиянием закачки промышленных сточных вод в палеоценовом водоносном комплексе произойдет повышение пластового давления. Радиус влияния закачки зависит от пьезопроводность пласта (χ) и период закачки ЖО.

За 20-летний период рассматриваемых скважинах: радиус и площадь влияния закачки промстоков составит: при $\chi = 23845,22 \text{ м}^2/\text{сут}$ 19790,35 м и 1229,8 км^2 ; при $\chi = 57361,43 \text{ м}^2/\text{сут}$ соответственно 30694,65 и 2958,4 км^2 .

Эффективная емкость поглощающего пласта определяется исходя из площади влияния закачки, эффективной толщины рабочего объекта захоронения и его эффективной пористости ($V_{эф} = S_k \cdot h_{эф} \cdot k_n$), где $V_{эф}$ – эффективный объем, м^3 ; S_k – площадь влияния закачки, м^2 ; $h_{эф}$ – эффективная толщина, м; k_n – коэффициент эффективной пористости.

Полезная емкость водоносного горизонта зависит также от упругих свойств пласта, которые проявляются при изменении пластового давления ($V_{упр} = \beta_n \cdot S_k \cdot h_{эф} \cdot \Delta P$), где $V_{упр}$ – приращение объема пласта за счет упругости, м^3 ; ΔP – средневзвешенное по площади избыточное давление, МПа; β_n – коэффициент упругости

пласта, МПа^{-1} . Коэффициент упругости пласта определяется ($\beta_n = k_n \cdot \beta_{ж} + \beta_c$), сумма коэффициентов сжимаемости жидкости ($\beta_{ж}$) и скелета породы (β_c). Коэффициенты сжимаемости при расчетах составляет: для жидкости $\beta_{ж} = 4,48 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$ и скелета породы при эффективной пористости 31% $\beta_c = 1 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$ [2, 15].

Коэффициент упругости для III объекта свиты горячего ключа палеоценовых отложений составляет: $\beta_n = k_n \cdot \beta_{ж} + \beta_c = 0,31 \cdot 4,48 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} = 2,39 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$.

Общая емкость поглощающего пласта (водоносного комплекса) определяется суммой эффективной емкости и приращения объема пласта за счет упругости.

При объемах закачке сточных вод 220 $\text{м}^3/\text{сут}$ (скважину №1Us) и 70 $\text{м}^3/\text{сут}$ (скважину №2Us), на конец расчетного 20-ного периода, их объем составит соответственно 1,6 млн м^3 и 0,511 млн м^3 . По отношению к общему объему поглощающего резервуара, объем закачиваемых промстоков составит 0,01 % и 0,0023 %.

В соответствии с требованиями, давление нагнетания не должно превышать давления гидроразрыва поглощающего пласта (ГРП). Для чего необходимо прогнозирование и мониторинг устьевое давление, при котором может быть достигнуто давление непроизвольного ГРП.

Расчетные данные по определению непроизвольного давления гидроразрыва сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты расчета величины давления непроизвольного гидроразрыва поглощающего пласта по скважинам

Table 2. Results of calculating the pressure value of involuntary hydraulic fracturing of the absorbent formation by wells

Скважина, №	$H, \text{м}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$P_{vm}, \text{МПа}$	$P_{sm}, \text{МПа}$	$P_{fl}, \text{МПа}$	$P_{hf}, \text{МПа}$	$P_{ww}, \text{МПа}$
Well, No	H, m	$\rho, \text{kg/m}^3$	P_{vm}, MPa	P_{sm}, MPa	P_{fl}, MPa	P_{hf}, MPa	P_{ww}, MPa
1Us	1288	1005	28,89	13,38	0,164	24,38	12,49
2Us	1265	999	29,24	12,53	0,01	24,59	12,26

где, H – глубина залегания поглощающего пласта, м; ρ – плотность пластовой воды, кг/м^3 ; P_{vm} – вертикальное горное давление, МПа; P_{sm} – боковое горное давление, МПа; P_{fl} – потери давления на трение, МПа; P_{hf} – давление гидроразрыва, МПа; P_{ww} – давление на устье скважины, МПа.

Для не допущения ГРП поглощающего пласта не рекомендуется увеличение устьевое давление выше 10 МПа. При закачке промстоков в пласт в нагнетательной скважине будет происходить рост пластового давления. Расчет увеличения пластового давления в нагнетательных скважинах за 20-летний период эксплуатации полигона приведен в таблице 3.

Таблица 3. Расчет увеличения пластового давления в нагнетательных скважинах за 20-летний период эксплуатации полигона**Table 3.** Calculation of the increase in reservoir pressure in injection wells over a 20-year period of operation of the landfill

Сква- жина, № Well, No	γ , кг/м ³ γ , kg/m ³	Q , м ³ /сут Q , m ³ /day	k_f , м/сут k_f m/day	h_{ef} , м h_{ef} , m	χ , м ² /сут χ m ² /day	r_w^2 , м r_w^2 , m	P_{rp} , МПа P_{rp} MPa	ΔP_{ls} , МПа ΔP_{ls} MPa	t , сут t , day	ΔP_t , МПа ΔP_t MPa	P_{rp} , МПа P_{rp} MPa
1Us	1000	220	0,079	40	24901,84	0,01	10,85	1,8	365	1,5	14,11
									1825	1,6	14,24
									3650	1,63	14,28
									5475	1,66	14,31
									7300	1,67	14,32
2Us	1000	70	0,19	23	59903,19	0,01	10,65	0,5	365	0,36	11,51
									1825	0,38	11,53
									3650	0,39	11,54
									5475	0,4	11,54
									7300	0,4	11,55

где P_{rp} – пластовое давление, МПа; ΔP_t – увеличение пластового давления в следствие закачки промстоков в нагнетательной скважине, МПа; P_{ls} – потеря давления в замковых соединениях, МПа; Q – дебит закачки, м³/сут; γ – плотность стоков, кг/см³; k_f – коэффициент фильтрации, м/сут; h_{ef} – эффективная толщина пласта, м; t – продолжительность закачки, сут; χ – пьезопроводность, м²/сут; r_w^2 – радиус скважины, м.

Как следует из таблицы 4, максимальное пластовое давление в нагнетательных скважинах спустя 20-летний период закачки составит 14,32 МПа и 11,55 МПа, для скважин №1Us и №2Us соответственно. Как следует из приведенных расчетов, избыточное устьевое давление через 20-летний период эксплуатации полигона в скважине №1Us достигнет 2 МПа, что составит 15 % от устьевого давления

непроизвольного ГРП. В скважине №2Us избыточное давление на устье составит минус 0,8 МПа.

Как было показано выше, палеоценовый комплекс в зоне влияния закачки выходов на дневную поверхность не имеет, и в зоне воздействия закачки не расчленен региональными высокоамплитудными разрывными нарушениями. Расчеты проведены для бесконечного пласта. Повышение уровней пластовых вод на различных расстояниях от скважины в зависимости от ФЕС пласта и времени закачки рассчитано в соответствии с методикой [21]. Результаты расчета увеличения пластового давления при закачке промстоков в скважине приведены в таблице 4. Исходными параметрами для расчета приняты следующие:

Таблица 4. Результаты расчет увеличения пластового давления в результате закачки промстоков в поглощающий пласт палеоценовых отложений**Table 4.** Results of calculation of the increase in reservoir pressure as a result of injection of industrial waste into the absorbing layer of Paleocene sediments

Рост напоров Increase in pressure		Удаление от скважины, км Distance from well, km								
Продолжительность закачки, лет Duration of download, years		Исходные параметры для скважин №2 Us: $\gamma = 1$ г/см ³ ; $Q = 220$ м ³ /сут; $k_f = 0,076$ м/сут; $h_{эф} = 40$ м; $\chi = 23845,22$ м ² /сут Initial parameters for wells No. 2 Us: $\gamma = 1$ g/cm ³ ; $Q = 220$ m ³ /day; $k_f = 0.076$ m/day; $h_{ef} = 40$ m; $\chi = 23845.22$ m ² /day								
		0,82	1	2	5	7	10	12	15	20
1		19	17	9	-	-	-	-	-	-
5		29	26	18	8	4	-	-	-	-
10		33	30	22	12	8	4	2	-	-
15		35	33	25	14	10	6	4	2	1
20		37	34	26	16	12	8	6	3	1
Продолжительность закачки, лет Duration of download, years		Исходные параметры для скважин №3 Us: $\gamma = 1$ г/см ³ ; $Q = 70$ м ³ /сут; $k_f = 0,18$ м/сут; $h_{эф} = 23$ м; $\chi = 57361,42$ м ² /сут Initial parameters for wells No. 3 Us: $\gamma = 1$ g/cm ³ ; $Q = 70$ m ³ /day; $k_f = 0.18$ m/day; $h_{ef} = 23$ m; $\chi = 57361.42$ m ² /day								
		0,73	1	2	5	7	10	12	15	20
1		6	5	3	1	-	-	-	-	-
5		8	7	5	3	2	1	<1	<1	-
10		9	8	6	4	3	2	2	1	<1
15		10	9	7	4	4	3	2	2	1
20		10	9	7	5	4	3	3	2	1

Расчет радиуса «пятна загрязнения» произведен с учетом уже закачанного количества промстоков за прошедший период с начала эксплуатации полигона захоронения. Радиус «пятна загрязнения» для скважин рассчитан исходя из поршневого вытеснения стоками пластовых вод. Который зависит от: коэффициентов надежности (принимается 1,5), вытеснения пластовой воды (0,7) и эффективной пористости поглощающего пласта; эффективной толщины поглощающего пласта; объема и время закачки сточных вод. Радиус «пятна загрязнения» промстоками палеоценовых отложений при их закачке в течение 20 лет соответственно составили: в объеме 220 м³/сут – 368 м (скважина № 1Us) и 70 м³/сут – 272 м (скважина №2Us). По промысловым данным закачка промстоков в скважину №1Us производилась объеме более 10 раз чем в скважину №2Us ежегодно (32849 м³ при 3576 м³).

Кроме кругового распространения ЖО вокруг поглощающих скважин, необходимо учитывать снос «пятна загрязнения» естественным потоком пластовых вод. среднюю скорость движения палеоценовых вод определено в величине 2,5 м/год при перепаде уровней 34–40 м.

В таблице 5 приведены данные замеров пластовых давлений на полигонах «Люминофор» (Lph) и рассматриваемого полигона (CP), из которых видно, что перепад напоров между скважинами незначителен и находится в пределах погрешности инструментальных замеров. Поэтому для оценили скорость сноса используем данные перепада напоров между скважинами 2Люм, 1РП и участками захоронения, на которую влияет коэффициент проницаемости, перепад напоров, динамическая вязкость, расстояние между скважинами и пористость.

Таблица 5. Расчет сноса зон распространения промстоков в поглощающем пласте

Table 5. Calculation of the drift of industrial waste zones in the absorption layer

Пункты сравнения, скважины Comparison points, wells	Расстояние между скважинами, м Distance between wells, m	Проницаемость, 10 ⁻¹² м ² Permeability, 10 ⁻¹² m ²	Перепад давления, МПа Drop pressure, MPa,	Динамическая вязкость, МПа.с Dynamic viscosity, MPa.s	Пористость, доли ед. Porosity, fractions of units	Скорость, м/год Speed, m/year	Расстояние сноса через 20–100 лет, м Demolition distance after 20–100 years, m
2Lph / 1CP	21600	0,0323	0,2	0,347·10 ⁻⁹	0,31	0,088	1,76 / 88
2Lph / 2CP	36000	0,0777	0,17	0,347·10 ⁻⁹	0,31	0,1	2 / 100

Из проведенных расчетов видно, что как в период закачки, так и после ее прекращения зона, занятая промстоками в пласте, будет находиться в пределах горного отвода подземного резервуара. Забойные давления весь период закачки не будут достигать давлений ГРП.

При пользовании недрами для захоронения сточных вод устанавливаются границы горного отвода, соответствующие контуру распространения сточных вод в пласте-коллекторе и смежных (буферных) водоносных горизонтах на конец расчетного срока эксплуатации. Соответственно, горный отвод для рассматриваемого первого и второго участка должен охватывать радиус распространения промстоков в поглощающем и буферном пласте на конец 20-летнего периода эксплуатации полигона. По скважине №1Us и №2Us радиус распространения промстоков соответственно составляет 368 м и 272 м, где при использовании скважины №3Us и №4Us как резервные под закачку промстоков, необходимо при установлении горного отвода учесть возможный радиус распространения промстоков. При параметрах поглощающего пласта соответственно для первого и второго участка: $h_{ef}=36$ м и 33 м, $k_n=0,28$ и 0,29 и закачке с дебитом $Q=220$ м³/сут и 70 м³/сут в течение 20 лет, радиус распространения стоков составит соответственно 408 м и 235 м.

Поглощающий горизонт, как резервные, так и буферные не имеют выходов на дневную поверхность и не осложнены региональными дизъюнктивными нарушениями в зоне распространения влияния закачки. Участки полигона закачки промстоков расположены на разных периклиналях одной складки, и над буферным горизонтом в каждом их выделяется шестиметровый глинистый пропласток. Над поглотительным горизонтом эксплуатируется подземное хранилище газа в

зеленой свите и хадумском горизонте, которые в свою очередь залегают под пятисотметровой толщей майкопских глин.

В связи с крайне благоприятными геологическими условиями для подземного захоронения сточных вод, основной причиной отклонения от проектных показателей эксплуатации полигона может служить колюматация интервалов перфорации и призабойной зоне пласте. При этом может развиваться целый ряд негативных процессов: повышается давление нагнетания в поглощающую скважину, увеличивается гидродинамическое воздействие на поглощающий горизонт и увеличивается радиус распространения промстоков. Если указанные процессы не регулировать, то они могут создать крайне неблагоприятную гидрогеологическую обстановку: увеличение пластового давления в поглощающем горизонте выше давления ГРП, повышение уровня жидкости в контрольных скважинах выше устья и выход пятна распространения промстоков за границы горного отвода.

Были рассмотрены базовый вариант закачки промстоков, где объемы закачки приняты по максимальной производительности очистных сооружений, где периодичность закачки осуществляется в течение всего года, с целью не допустить выхода «пятна распространения» промстоков за пределы предполагаемого горного отвода.

При закачке промстоков в поглощающем пласте будет происходить изменение гидродинамического поля. Вокруг нагнетательной скважины формируется репрессивная воронка и происходит увеличение напоров в пласте-коллекторе. При рассматриваемых дебитах закачки и принятых параметрах пласта площадь влияния на конец

расчетного срока эксплуатации полигона по участкам №1Us и № 2Us составит 1230 км², и 2960 км² соответственно. Оказываемое прогнозируемое воздействие невелико и практически не окажет заметного влияния на гидродинамическую обстановку в поглощающем пласте. Расчетное увеличение напора пластовых вод в наблюдательной скважине №1Us через 20-летний период эксплуатации полигона составит 40 м, а на расстоянии 15 км от нагнетательной скважины 3 м. В расчетах не учтено расформирование репресссионной воронки в периоды простоя нагнетательных скважин, что придает определенный запас прочности полученным результатам. В поглощающих скважинах также произойдет рост пластового давления, где за 20-летний период времени он составит 1,67 МПа (скважина №2Us) и 0,4 МПа (скважина №3Us).

Кольматация перфорационных отверстий и призабойной зоны пласта будет приводить к увеличению репрессии в скважине. Рассмотрено несколько вариантов возможных отклонений от проектных показателей эксплуатации полигона, в том числе и тот, при котором произойдет гидроразрыв поглощающего пласта. Для скважины №2Us минимальная необходимая для этого репрессия равняется 8,6 МПа. При дебите закачки в 220 м³/сут, для достижения такой величины репрессии необходимо снижение коэффициента приемистости с нынешних 121 м³/МПа·сут до 25 м³/МПа·сут. Как показал опыт эксплуатации полигона, процесс кольматации в скважине протекает медленно и при своевременном проведении необходимых наблюдений может быть своевременно обнаружен и устранен. Для скважины 3Us минимальная величина репрессии, при которой произойдет гидроразрыв пласта, составляет 13,3 МПа·сут, и будет достигнута при снижении коэффициента приемистости с нынешних 136 м³/МПа·сут до 5,3 м³/МПа·сут.

Следующим процессом, сопровождающим закачку промстоков в пласт-коллектор, будет его загрязнение жидкими отходами. Закачиваемые в водоносный горизонт промстоки будут оттеснять пластовые воды, частично смешиваясь с ними. Процесс смешивания рассмотрен в соответствующем разделе. Совместимость промстоков с пластовыми водами и породой поглощающего горизонта удовлетворительная. При соблюдении технологии подготовки промстоков кольматации пласта не ожидается. Нет оснований ожидать при смешивании образования каких-либо газов или новых токсичных веществ.

Рассчитанные радиусы распространения «пятен загрязнения» с учетом уже закачанного объема промстоков для скважин №2Us и №3Us составляют 368 м и 272 м соответственно. Снос промстоков в поглощающем пласте под воздействием естественного потока пластовых вод составит порядка 2 м за 20 лет. Через 1000 лет снос «пятен загрязнения» составит порядка 100 м и они не выйдут за пределы горного отвода ПХГ.

В результате закачки промстоков, имеющих температуру ниже пластовой в поглощающем пласте будет происходить формирование областей охлаждения вокруг поглощающих скважин. Области охлаждения пласта против интервалов поглощения при длительной закачке образуются на площади 0,1–0,2 км². После прекращения закачки происходит постепенное увеличение пластовой температуры.

Термометрия является показательным методом для контроля за распространением промстоков в поглощающем пласте. Нижняя его температурной аномалии граница будет определяться резким увеличением градиента на термограмме в работающей скважине, а верхняя – отрицательной аномалией на термограмме после остановки закачки даже на несколько часов.

Естественные изменения геологической среды, которые подразделяются на экзогенные и эндогенные, малозначимы и не вызовут аварийных ситуаций на полигоне. На Ставрополье в широких масштабах развиты такие экзогенные геологические процессы как оползни и оврагообразование. Но они затрагивают верхнюю часть геологической среды (первые десятки метров) и для коллекторских горизонтов, залегающих на глубинах 1100–1500 метров, они малозначимы. Эндогенные процессы являются основной причиной формирования тектонических структур. Усиление тектонической активности не бывает внезапным, ей предшествует длительный период усиления сейсмичности, измеряемый десятками и сотнями тысяч лет. Как показывает опыт, даже землетрясения практически не оказывают влияния на горизонты, залегающие на этих глубинах, в худшем случае может разрушиться устьевое оборудование.

Учитывая удовлетворительную совместимость очищенных промстоков с пластовыми водами и породой поглощающего пласта, негативных последствий, связанных с разрушением покрышек (растворение кислотами, выщелачивание и т.п.) не ожидается. Расчеты диффузии через покрышки толщиной более 50 м практического интереса не представляют и поэтому не выполнялись.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что геологические и технологические условия подземного захоронения промстоков на рассматриваемом полигоне обеспечивают необходимый уровень экологической и промышленной безопасности, а при возникновении форсмажорных обстоятельств, возможны альтернативные варианты утилизации промстоков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при фактических объемах закачки воздействие полигона захоронения промышленных стоков и жидких отходов на гидродинамическую систему минимально и выход промстоков за пределы горного отвода при фактических объемах закачки в поглощающий пласт толщиной 23 м практически не представляется возможным. Негативное воздействие на окружающую среду при предложенном виде утилизации промстоков будет оказываться в основном на глубокозалегающий поглощающий пласт, а благоприятные геологические условия участка захоронения практически исключают выход промстоков за пределы горного отвода и перетоки их в вышележащие отложения. А также над поглощающим горизонтом имеются два буферных горизонта и один резервный (зеленая свита и хадумский горизонт).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gasumov E.R., Gasumov R.A., Minchenko Yu.S. Features of the underground storages construction in depleted oil

- and gas condensate fields // *Notes of the Mining Institute*. 2020. V. 244. P. 418–427. DOI: 10.31897/pmi.2020.4.4
2. Ивченко М.В., Мельников Е.А., Хвостова В.Ю., Чугунов А.В. Захоронение промышленных сточных вод на подземных хранилищах газа // *Газовая промышленность*. 2017. N S1(750). С. 112–117.
3. Гасумов Э.Р., Велиев В.М. Методы обеспечения экологической безопасности при разработке малых газоконденсатных месторождений // *Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли. Проблемы устойчивого развития»*, Ставрополь, Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. С. 402–412.
4. Гасумов Э.Р., Павлюкова И.В., Гасумов Р.А., О влиянии техногенных факторов на геотехнические системы и обеспечении экологической безопасности разработки месторождений углеводородов // *Территория Нефтегаз*. 2016. N 7-8. С. 110–115.
5. Бешенцев В.А. Захоронение сточных вод в глубокие водоносные горизонты // *Научный лидер*. 2021. Вып. 9(11). URL: <https://scilead.ru/article/154-zakhoronenie-stochnik-vod-v-glubokie-vodonosn> (дата обращения: 3.04.2024)
6. Зверев В.П. Гидрохимические исследования системы гипсы подземные воды. Москва: Наука, 1967. 99 с.
7. Ильченко В.П. и др. Технология газопромысловых гидрогеологических исследований. Москва: Недра, 1997. 300 с.
8. Ильченко В.П. и др. Технология глубинных нефтегазопромысловых гидрогеологических исследований. Москва: Недра, 1992. 173 с.
9. Гасумов Р.А. Особенности разработки малых месторождений (на примере газоконденсатных месторождений Северного Кавказа) // *Записки горного института*. 2016. Т. 220. С. 556–563. DOI: 10.18454/PMI.2016.4.556
10. Il'nykh G. et al. A life cycle assessment of drilling waste management: a case study of oil and gas condensate field in the north of western Siberia, Russia // *Sustainable Environment Research*. 2023. V. 33. N 9. P. 1–17. <https://doi.org/10.1186/s42834-023-00171-0>
11. Крупнова Т.Г., Ракова О.В. Специальные методы очистки водных систем в промышленности. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2020. 70 с.
12. Абдурахманов Р.Ф. Проблема удаления жидких промышленных стоков в глубокие водоносные горизонты // *Геологический вестник*. 2019. N 1. С. 159–165. <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-13>
13. Боровская В.А. и др. Гидрогеологические исследования для захоронения промышленных сточных вод в глубокие водоносные горизонты. Москва: Недра, 1976. 311 с.
14. Абдулмуталимова Т.О., Рамазанов О.М., Алхасов А.Б., Газалиев И.М. Оценка качества подземных вод, используемых в хозяйственно-питьевых целях в Республике Дагестан // *Юг России: экология, развитие*. 2023. Т. 18. N 2. С. 92–101. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-2-92-101>
15. Рыбальченко А.И. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. Москва: ИздАТ, 1994. 256 с.
16. Njuguna J. et al. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations // *Waste Management*. 2022. V. 139. P. 362–380. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025>
17. Krupskaya L.T., Orlov A.M., Golubev D.A., Kolobanov K.A., Filatova M.A. Assessment of environmental hazard of accumulated mineral processing waste of closed mining enterprises in the Amur river region and Primorye // *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020. V. 5. N 3. P. 208–223. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-3-208-223>

REFERENCES

- Gasumov E.R., Gasumov R.A., Minchenko Yu.S. Features of the underground storages construction in depleted oil and gas condensate fields. *Notes of the Mining Institute*, 2020, vol. 244, pp. 418–427. (In Russian). DOI: 10.31897/pmi.2020.4.4
- Ivchenko M.V., Mel'nikov E.A., Khvostova V.YU., Chugunov A.V. Chronation of industrial wastewater in underground gas storage facilities. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas Industry Journal]. 2017, no. S1(750), pp. 112–117. (In Russian)
- Gasumov E.R., Veliev V.M. [Metody obespecheniya ehkologicheskoi bezopasnosti pri razrabotke malykh gazokondensatnykh mestorozhdenii]. In: *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnye tekhnologii v neftegazovoi otrasli. Problemy ustoichivogo razvitiya»*, Stavropol', 2020 [Collection of works of the International scientific and practical conference "Innovative technologies in the oil and gas industry. Problems of sustainable development", Stavropol, 2020]. Stavropol, North Caucasus Federal University Publ., 2020, pp. 402–412. (In Russian)
- Gasumov E.R., Pavlyukova I.V., Gasumov R.A. Effect of man-made factors on geotechnical systems and ensuring ecological safety of hydrocarbon fields development. *Territoriya Neftegaz* [Territory "Neftegaz"]. 2016, no. 7-8, pp. 110–115. (In Russian)
- Beshentsev V.A. [Disposal of waste water in deep aquifers]. *Scientific leader*, 2021, no. 9(11). (In Russian) Available at: <https://scilead.ru/article/154-zakhoronenie-stochnik-vod-v-glubokie-vodonosn> (accessed 3.04.2024)
- Zverev V.P. *Gidrokhimicheskie issledovaniya sistemy gipsy podzemnye vody* [Hydrochemical studies of the gypsum-groundwater system]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 99 p. (In Russian)
- Il'chenko V.P. et al. *Tekhnologiya gazopromyslovykh gidrogeologicheskikh issledovaniy* [Technology of gas field hydrogeological research]. Moscow, Nedra Publ., 1997, 300 p. (In Russian)
- Il'chenko V.P. et al. *Tekhnologiya glubinykh neftegazoposkovykh gidrogeologicheskikh issledovaniy* [Technology of deep oil and gas exploration hydrogeological research]. Moscow, Nedra Publ., 1992, 173 p. (In Russian)
- Gasumov R.A. The specifics of operating minor deposits (as given by the examples of gas condensate deposits of the Northern Caucasus). *Journal of Mining Institute*, 2016, vol. 220, pp. 556–563. (In Russian) DOI: 10.18454/PMI.2016.4.556
- Il'nykh G. et al. A life cycle assessment of drilling waste management: a case study of oil and gas condensate field in the north of western Siberia, Russia. *Sustainable Environment Research*, 2023, vol. 33, no. 9, pp. 01–17. <https://doi.org/10.1186/s42834-023-00171-0>
- Krupnova T.G., Rakova O.V. *Spetsial'nye metody ochistki vodnykh sistem v promyshlennosti* [Special methods of cleaning water industry]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2020, 70 p. (In Russian)

12. Abdrakhmanov R.F. The problem of removal of liquid industrial effluents in deep aquifers. *Geologicheskii vestnik*, 2019, no. 1, pp. 159–165. (In Russian) DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-13>
13. Borevskaya V.A. et al. *Gidrogeologicheskie issledovaniya dlya zakhoroneniya promyshlennykh stochnykh vod v glubokie vodonosnye gorizonty* [Hydrogeological studies for the disposal of industrial wastewater in deep aquifers]. Moscow, Nedra Publ., 1976, 311 p. (In Russian)
14. Abdulmutalimova T.O., Ramazanov O.M., Alhasov A.B., Gazaliev I.M. The assessment of quality of groundwater used for drinking by the population of the Republic of Dagestan, Russia. *South of Russia: ecology, development*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 92–101. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-2-92-101>
15. Rybalchenko A.I. et al. *Glubinnoe zakhoroneniye zhidkikh radioaktivnykh otkhodov* [Deep burial of liquid radioactive waste]. Moscow, Izdat Publ., 1994, 256 p. (In Russian)
16. Njuguna J. et al. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations. *Waste Management*, 2022, vol. 139, pp. 362–380. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025>
17. Krupskaya L.T., Orlov A.M., Golubev D.A., Kolobanov K.A., Filatova M.A. Assessment of environmental hazard of accumulated mineral processing waste of closed mining enterprises in the Amur river region and Primorye. *Mining Science and Technology (Russia)*, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 208–223. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-3-208-223>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Рамиз А. Гасумов и Эльдар Р. Гасумов собрали промышленные материалы и проводили исследования, проанализировали данные. Оба автора в равной степени участвовали в написании рукописи, и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ramiz A. Gasumov and Eldar R. Gasumov collected material in the field and conducted research, analysed the data. Both authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Рамиз А. Гасумов / Ramiz A. Gasumov <http://orcid.org/0000-0002-4700-2391>

Эльдар Р. Гасумов / Eldar R. Gasumov <http://orcid.org/0000-0003-2704-0523>