

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СПОСОБА ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

А.М. Маслов¹, А.С. Орлов¹

¹ НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: alorlov13@gmail.com

Аннотация: Гидравлический разрыв пласта широко применяется для добычи нефти и сланцевого газа, однако имеет серьезные экологические риски. В работе выполнен обзор актуальных научных данных об экологических последствиях гидроразрывов пластов и методах их снижения. Выявлено, что основные риски включают загрязнение подземных и поверхностных вод химическими реагентами и метаном, индуцированную сейсмичность, выбросы парниковых газов и токсичных веществ в атмосферу, а также нарушения экосистем. Приводятся задокументированные случаи миграции метана в питьевые водоносные горизонты рядом со скважинами, загрязнения рек сточными водами от гидроразрыва пласта, накопления радионуклидов на местах хранения отходов и возникновения землетрясений, спровоцированных закачкой жидкостей. Обсуждаются лучшие практики и технологии минимизации последствий: обеспечение целостности скважин, очистка и повторное использование сточных вод, мониторинг сейсмической активности и системы «светофора» для остановки работ при толчках, использование менее токсичных реагентов и строгие экологические нормы. Сделан вывод, что при надлежащем контроле и внедрении указанных мер можно существенно снизить экологические риски гидроразрыва пласта, обеспечивая более устойчивое освоение углеводородных ресурсов.

Ключевые слова: гидроразрыв, экологические риски, метан, мониторинг, индуцированная сейсмичность, загрязнение, окружающая среда, утечки метана, негативные последствия.

Для цитирования: Маслов А. М., Орлов А. С. Анализ потенциальных экологических рисков при применении способа гидроразрыва пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 1. – С. 59–70. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_59.

Potential ecological risks of hydraulic fracturing

A.M. Maslov¹, A.S. Orlov¹

¹ NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: alorlov13@gmail.com

Abstract: Hydraulic fracturing is widely used in oil and shale gas production and involves some serious ecological risks. This article reviews some present-day scientific data on ecological consequences of hydraulic fracturing and their abatement methods. It is found that the main risks are pollution of ground and surface water with chemical reagents and methane, induced seismicity, air emission of greenhouse gases and toxic substances, as well as disturbance of ecosystems. The article describes some documented cases of methane migration from wells into nearby aquifers bearing drinkable water, pollution of rivers with waste water of hydraulic

fracturing, accumulation of radionuclides at waste storages and earthquakes provoked by fluid injection. The scope of the discussion embraces the best practices and technologies of minimization of disamenities: maintenance of integrity of wells, treatment and recycling of waste water, monitoring of seismic activity and a 'traffic lights' system to shut down operations in case of shocks, the use of less toxic reagents and adherence to strict ecological standards. It is concluded that proper control and introduction of the listed measures can enable essential reduction of ecological risks of hydraulic fracturing and ensure sustainable recovery of hydrocarbon resources.

Key words: hydraulic fracturing, ecological risk, methane, monitoring, induced seismicity, pollution, environment, methane leakage, disamenities.

For citation: Maslov A. M., Orlov A. S. Potential ecological risks of hydraulic fracturing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(1):59-70. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_59.

Введение

Гидроразрыв пласта (ГРП, hydraulic fracturing, fracking) — это технология интенсификации добычи нефти и газа, при которой в нефтегазоносный пласт закачивается под высоким давлением большая масса жидкости с проппантом (песком) и химическими добавками. Цель — создание трещин в горной породе для повышения проницаемости и притока углеводородов. Метод ГРП получил широкое распространение в последние десятилетия [1–3], особенно в развитии сланцевого газа и сланцевой нефти в США, что спровоцировало «сланцевую революцию». Благодаря этому технологии ряд стран получили возможность добывать ранее недоступные ресурсы, повысив энергетическую независимость. Однако вместе с экономическими преимуществами возникли опасения по поводу экологических последствий ГРП.

С 2000-х годов в научной литературе и СМИ активно обсуждаются риски фрекинга для окружающей среды. Противники технологии указывают на случаи загрязнения питьевой воды, выбросы метана, землетрясения и другие проблемы. В ряде стран введены ограничения или моратории на применение ГРП из-за экологических соображений

(например, во Франции, некоторых землях Германии, временно в Великобритании). Тем не менее, в мире продолжается промышленное использование ГРП, в том числе в России при разработке трудноизвлекаемых запасов. В этих условиях особую актуальность приобретает объективная оценка экологических рисков метода и разработка мер по их снижению.

Настоящая статья обобщает данные научных исследований об экологических рисках гидроразрыва пласта и путях их минимизации. Рассматриваются основные направления воздействия ГРП на окружающую среду — гидросфера (подземные и поверхностные воды), литосфера (сейсмичность), атмосфера (выбросы газов) и биота [4, 5]. Приводятся примеры подтвержденных случаев экологических проблем, связанных с фрекингом, с опорой на публикации российских и зарубежных авторов. В заключение обсуждаются современные технологии и практики, позволяющие снизить негативное воздействие ГРП на природу при сохранении экономической эффективности добычи.

Методы

Данное исследование выполнено в форме аналитического обзора (literature

review) с элементами сравнения нескольких кейсов. Проведен сбор и анализ научной литературы по тематике экологической безопасности ГРП, включая статьи в рецензируемых журналах, отчеты природоохранных органов и обзоры отраслевых экспертов (как российских, так и иностранных) [6]. Основное внимание уделено публикациям за последние ~10–15 лет, когда проблема получила широкое освещение.

В выборку вошли как обобщающие работы (например, критические обзоры риска для водных ресурсов), так и оригинальные исследования конкретных случаев (в том числе полевые измерения загрязнений и сейсмических событий).

При анализе литературы идентифицированы ключевые категории экологических рисков ГРП [7–9]. Для каждой категории обобщены обнаруженные причинно-следственные связи и масштаб последствий, подтвержденные данными. Также рассмотрены предложения и меры, описанные в источниках, для предотвращения или смягчения соответствующих рисков. Отдельно были изучены кейсы в разных регионах (Северная Америка, Европа, и др.), где документированы инциденты, связанные с фрекингом, с целью извлечь уроки по улучшению практики. Информация из источников сведена в структуру IMRAD: результаты представлены по направлениям воздействия, а в обсуждении даны рекомендации по минимизации рисков [10, 11].

Ограничения метода: обзор опирается на доступные публикации и может не учитывать неопубликованные данные компаний.

Тем не менее, использование множества независимых источников [12–14] позволяет получить достоверную и объективную картину известных экологических последствий ГРП.

Результаты

Анализ риска загрязнения подземных вод

Одним из наиболее обсуждаемых экологических рисков фрекинга является возможное загрязнение подземных водоносных горизонтов, используемых для водоснабжения. В состав жидкости ГРП входит до 0,5–2% различных химических реагентов (гелеобразователей, биоцидов, поверхностно-активных веществ, ингибиторов коррозии и др.), что при объемах закачки в миллионы литров на скважину приводит к десяткам тысяч литров химикатов. Большинство применяемых соединений токсичны и содержат, например, соли тяжелых металлов, формальдегид, ароматические углеводороды (в т.ч. бензол) и другие стойкие загрязнители, способные длительно сохраняться в окружающей среде [15]. Теоретически прорыв этих веществ из глубинного пласта в мелкие водоносные слои маловероятен из-за больших глубин залегания и наличия непроницаемых пород. Однако основной путь загрязнения грунтовых вод — это неплотность скважин (некачественная цементация) и миграция газа по разломам и каналам вокруг обсадных колонн.

Фактические случаи попадания метана в питьевую воду вокруг мест разработки сланцевого газа задокументированы в научных исследованиях. В частности, для района Марцеллус (штат Пенсильвания, США) определено систематическое повышение концентрации метана в частных колодцах по мере приближения к действующим газовым скважинам. В среднем при наличии скважин в радиусе 1 км содержание метана в воде составляло ~19 мг/л, а максимальное содержание достигало 64 мг/л, что представляет потенциал взрывоопасности, тогда как в колодцах вне зон добычи средняя концентрация была ~1 мг/л. Изотопный анализ подтвердил термоген-

ное происхождение метана (то есть из глубоких пластов), а не биогенное, что указывает на утечку газа из скважин в водоносные горизонты. В то же время прямого попадания жидкости гидроразрыва или высокоминерализованных глубинных вод в питьевые образцы не обнаружено. Это означает, что основной риск для подземных вод — утечка природного газа (метана) через дефекты в колонне или по нарушенным разломам, тогда как проникновение именно химикатов ГРП в питьевую воду остается маловероятным сценарием (за исключением аварий) [16].

Тем не менее, риск химического загрязнения подземных вод не нулевой. В 2016 г. Агентство по охране окружающей среды США (EPA) после масштабного исследования пришло к выводу, что фрекинг способен приводить к загрязнению питьевой воды на всех стадиях технологического цикла — от забора воды и химикатов до закачки, оттока возвратных вод и их хранения или утилизации. В финальном отчете отмечены подтвержденные случаи:

- утечка метана в водоносные горизонты;
- проливы химикатов и растворенных веществ на поверхности с последующей инфильтрацией;
- прямое закачивание фрекингových жидкостей в водоносный слой (в редких аварийных ситуациях);
- сброс недостаточно очищенных сточных вод ГРП в реки;
- хранение или захоронение отходов в негерметичных амбарах, что приводило к миграции загрязнителей в грунтовые воды [17].

Хотя авторы подчеркнули, что масштаб распространения подобных инцидентов не является «всеобщим и системным», наличие отдельных случаев требует постоянного внимания и превентивных мер.

Анализ риска загрязнения поверхностных вод и почвенных экосистем

Помимо подземных вод, технология ГРП создает нагрузку на поверхностные водные объекты. Во-первых, для проведения разрыва требуется значительный объем воды, откачиваемой из рек или водохранилищ, что в засушливых регионах способно приводить к дефициту водных ресурсов и конфликтам с другими водопользователями. Во-вторых, после разрыва из скважины возвращается часть закачанной жидкости (flowback) вместе с высокоминерализованной пластовой водой. Такой фрекингový сток характеризуется повышенной минерализацией, содержит растворенные органические вещества, тяжелые металлы, радиоактивные элементы (например, радий-226/228 из породы) и остаточные реагенты. Обращение с этими отходами представляет серьезный экологический вызов.

Основные пути негативного воздействия на поверхностные воды — проливы и утечки при хранении, транспортировке и утилизации возвратных вод. В районах интенсивной добычи сланцевого газа (например, в Пенсильвании, США) выявлены случаи загрязнения ручьев и рек в результате аварийных разливов и ненадлежащей утилизации промышленных стоков. В окрестностях мест хранения и сброса сточных вод ГРП обнаружено накопление токсичных и радиоактивных элементов в донных отложениях водотоков и в почве. В частности, зафиксировано обогащение отложений изотопами радия в местах, где ранее осуществлялся сброс плохо очищенных вод после фрекинга. Такие загрязнения могут сохраняться длительное время, постепенно распространяясь с потоком воды и попадая в пищевые цепи.

В России подобные риски также признаются. В работах отечественных

исследователей перечисляются следующие экологические последствия ГРП [18, 19]: возможное попадание токсичных солевых растворов в поверхностные воды при утечках, засоление почв, гибель растительности вокруг прудов-испарителей, а также общее нарушение ландшафтов при обустройстве инфраструктуры добычи (прокладка дорог, вырубка лесов под скважинные площадки). Таким образом, без должных мер предосторожности поверхностные экосистемы — реки, озера, грунты — могут подвергаться негативному воздействию из-за ГРП. В документированных случаях основными загрязнителями были соли (хлориды, сульфаты), тяжелые металлы (барий, стронций), нефтепродукты и остаточные реагенты.

Анализ риска индуцированной сейсмичности

Гидроразрыв пласта неизбежно вызывает микросейсмические события — небольшие землетрясения, сопровождающие разрыв породы. Как правило, большинство таких индуцированных толчков имеют магнитуду менее 2,0 и не ощущаются на поверхности. Однако мировой опыт показал, что в отдельных случаях фрекинг может спровоцировать более существенную сейсмичность. Наиболее значимые землетрясения часто связаны не столько с самим гидроразрывом, сколько с последующей закачкой отработанной жидкости в глубокие утилизующие скважины (методом пластовой закачки отходов).

Так, в центральных штатах США (Оклахома, Техас) с 2009 г. отмечен резкий рост числа землетрясений магнитуд $M \geq 3$, совпавший по времени с буром сланцевой добычи и масштабной закачкой сточных вод в пласт. Зафиксированы событие $M5.7$ в Оклахоме (2011 г., Праге) и рекордное $M5.8$ (2016 г., Паони) — оба официально связаны с

активностью скважин для утилизации жидкостей. Эти толчки вызвали повреждение зданий и инфраструктуры, став крупнейшими индуцированными землетрясениями на территории США. При этом непосредственно гидроразрыв вносит меньший вклад: как отмечает Геологическая служба США, крупнейший толчок, однозначно связанный именно с операцией ГРП, имеет магнитуду ~ 4.0 (зафиксирован в шт. Техас в 2018 г.). Для сравнения, в той же Оклахоме от фрекинга максимальная отмеченная величина — $M3.6$, что чувствуется людьми, но редко наносит ущерб. Таким образом, прямой сейсмический эффект фрекинга обычно ограничен малыми событиями, тогда как наиболее мощные землетрясения обусловлены закачкой больших объемов отходов, повышающей давление на глубинных разломах.

В западно-канадском бассейне (провинции Альберта, Британская Колумбия) в последние годы также участились землетрясения, связанные с гидроразрывом пластов. Отмечались события до $\sim M4.4$, вызвавшие беспокойство общественности. Статистика по формации Duvernay (Альберта) показывает, что примерно 6% операций ГРП сопровождаются сейсмичностью с $M_w > 3$. В Европе известен случай в Великобритании (месторождение Престон Нью Роуд, 2018—2019 гг.), где гидроразрыв вызвал серию толчков вплоть до $M \approx 2.9$, что привело к введению моратория на фрекинг в стране.

Индуцированные ГРП землетрясения происходят из-за повышения порового давления в зоне разломов и высвобождения упругой энергии пород. Риск выше там, где скважины проходят близко к тектоническим разломам или к фундаменту кристаллического основания, а пласт находится в критическом напряженном состоянии. Увеличивают вероятность сейсмичности также большие объемы и скорости закачки жидко-

сти и повышенное пластовое давление в целевом горизонте.

Анализ риска загрязнения атмосферы и парникового эффекта

Экологический риск ГРП затрагивает и атмосферу. Разработка сланцевых формаций сопровождается выбросами метана — основного компонента природного газа и мощного парникового газа. Метан может попадать в атмосферу при разгрузке скважины после разрыва, через утечки из арматуры, клапанов, трубопроводов и систем хранения [20]. Кроме того, на стадиях бурения и добычи работают дизельные двигатели (насосы, генераторы, автотранспорт), выбрасывающие оксиды азота, углеводороды и твердые частицы. В сочетании эти загрязнители способствуют образованию приземного озона и смоговых явлений, ухудшая качество воздуха.

Исследования в США фиксируют ухудшение атмосферы в регионах интенсивного фрекинга. Так, отмечено повышение фона летучих органических соединений (например, бензола) и периодическое превышение нормативов по озону в сельских районах, ранее считавшихся экологически чистыми. Рост загрязнения воздуха связывают с появлением множества разрозненных источников: сотен скважинных площадок, каждая из которых дает небольшие утечки углеводородов, но суммарно образуют значимый фон. Дополнительный вклад — сотни грузовиков, перевозящих воду, песок и отходы, что увеличивает трафик и эмиссии на местном уровне.

В глобальном плане утечки метана снижают климатическую выгоду природного газа относительно угля. По оценкам, реальные выбросы метана при добыче из сланцевых пластов могут быть до 50—60% выше, чем предполагалось в старых инвентаризациях ЕРА. Спут-

никовые и наземные измерения указывают, что официальные данные недооценивали вентиляционные потери, особенно в новых регионах нефтегазодобычи (например, сланцевом бассейне Баккен). Это означает, что без контроля за утечками фрекинг способен усилить парниковый эффект.

Наряду с парниковыми газами разработка скважин может локально ухудшать состояние атмосферы для населения. Вблизи промысла фиксировались случаи превышения допустимых концентраций сероводорода, углеводородных паров, отмечались жалобы на запахи и раздражение дыхательных путей у жителей. Хотя прямой токсикологический эффект выбросов ГРП изучен недостаточно, превентивно во многих регионах введены требования на использование технологий снижения выбросов (о них — в следующем разделе).

Обсуждение

Обобщение рисков

Проведенный анализ показывает, что при отсутствии должного экологического контроля ГРП может приводить к разнообразным негативным последствиям. Наиболее обоснованным из них является миграция метана в поверхностные водоносные горизонты из скважин с неполной герметизацией. Этот риск подтвержден полевыми данными и требует особого внимания, так как загрязнение питьевой воды метаном создает как бытовые неудобства, так и угрозу взрывов в замкнутых пространствах. Риск прямого химического загрязнения подземных вод флюидом ГРП признан значительно менее вероятным, однако не полностью исключается, особенно при авариях или ошибках (например, закачка на неправильной глубине). Загрязнение поверхностных вод и почв происходит главным образом из-за нештатных ситуаций — разливов, аварий, утечек, — а также

при неэффективной очистке возвратных вод. Примеры накопления радионуклидов и солей в окружающей среде вокруг объектов ГРП указывают на необходимость улучшения практики обращения с отходами. Сейсмический риск дифференцируется по масштабу: мелкие толчки сопутствуют почти каждому разрыву (что само по себе не опасно), но в ряде регионов отмечены ощутимые землетрясения, связанные с геологическими условиями и утилизацией жидкостей. Это требует мониторинга и превентивных мер при планировании работ. Атмосферные выбросы — фактор, влияющий не только на экологию, но и на здоровье населения и климат. Хотя по сравнению с промышленными заводами каждая скважина выбрасывает немного, суммарный эффект от сотен скважин заметен на уровне региона. Особенно важен контроль метановых утечек, чтобы сохранить климатические преимущества газа перед углем.

Меры минимизации рисков при ГРП

К счастью, большинство обозначенных рисков поддаются смягчению при внедрении современных технологий и надлежащем регулировании [21]. На основе изученных источников можно сформулировать следующие ключевые стратегии экологически ответственного применения ГРП.

- Обеспечение целостности скважин. Строгий контроль качества цементирования и технического состояния обсадных колонн — необходимое условие предотвращения утечек газа и жидкости. Регулярный контроль давления в затрубном пространстве и такие методы, как цементирование нескольких барьеров, позволяют минимизировать риск миграции метана в водоносные горизонты. В ряде стран введены стандарты на трех-четырёхслойную конструкцию

скважин в зонах питьевых вод. Это доказанно снижает вероятность коммуникации между пластом фрекинга и мелкими слоями.

- Рациональное управление водными ресурсами. Для снижения нагрузки на водоемы рекомендуется многократное использование (рециркуляция) фрекинговой жидкости. Современные проекты стараются очищать и повторно закачивать значительную долю возвратных вод, сокращая потребность в свежей воде и объемы отходов. Также важно планировать забор воды вне периодов маловодья, использовать альтернативные источники (например, сточные воды после очистки) и избегать заборов, способных обмелить экосистемы.

- Обращение с возвращаемыми жидкостями. Отработанные фрекинговые флюиды и пластовые воды следует хранить в закрытых емкостях, а не в открытых прудах, во избежание утечек в грунт и испарения. Необходима надежная изоляция (двойные стальные резервуары, противодиффузионные экраны под площадками). Транспортировка отходов должна проводиться герметично. Для окончательной утилизации применяют специальные глубинные скважины, выбираемые на основе геологических критериев (удаленность от разломов, большой покров над пластом-интервалом закачки). Очистка сточных вод перед сбросом — еще один критичный момент: например, удаление солей и радионуклидов до безопасных концентраций предотвращает их накопление в окружающей среде.

- Мониторинг и предупреждение загрязнений. Рекомендуется проводить базовое линейное обследование (baseline testing) подземных вод до начала ГРП, с последующим регулярным мониторингом качества воды в близлежащих колодцах и скважинах. Это позволяет своевременно выявить изменения

(например, всплеск метана или химических маркеров) и принять меры. Многие операторы в США добровольно участвуют в программах мониторинга, публикуют данные для общественности. Дополнительное оснащение площадок датчиками утечек, автоматическое отключение при разливах и планы ликвидации аварий — все это входит в стандарт «лучших практик».

- Контроль сейсмичности (Traffic Light System). Во избежание значительных толчков внедряется система «светофора», при которой в реальном времени отслеживается сейсмическая активность в районе работ с помощью геофонов. Например, регулятор Альберты (Канада) обязывает операторов при регистрации события $M \geq 2.0$ перейти в режим предупреждения (желтый уровень) — снизить темп закачки, поднять жидкость, а при $M \geq 4.0$ немедленно прекратить операции (красный уровень). Подобные протоколы уже действуют в Великобритании (правда, с весьма низким порогом 0,5) и ряде других регионов. Также снизить сейсмориск помогает предварительный геологический анализ: не проводить ГРП вблизи известных разломов, держать расстояние от подошвы осадочного чехла (чтобы не активировать разломы фундамента), а при выявлении зон со стрессовыми напряжениями — избегать закачки или предварительно разгрузить давление. Практика показывает, что правильный выбор участка и параметров закачки позволяет успешно провести разрывы без ощутимых толчков.

- Снижение выбросов и утечек. Для охраны атмосферы важны меры по улавливанию парниковых газов. Современные технологии Green Completions предполагают, что газ, выходящий из скважины при освоении после ГРП, не сжигается факелом и не выпускается в воздух, а собирается в трубопровод или в

емкости. Это уже стало обязательным требованием в США. Постоянный мониторинг метана (включая применение инфракрасных камер на установках) помогает оперативно устранять утечки из оборудования [22]. Для снижения смога применяют системы рекуперации паров на нефтяных резервуарах, а также переходят на менее загрязняющую технику: например, электрические насосы вместо дизельных, каталитические нейтрализаторы выхлопов на двигателях, оптимизация логистики для сокращения рейсов грузовиков. Все это существенно уменьшает выбросы VOC, NOx и частиц.

- Использование более безопасных материалов. Химическая формула фрекинговой жидкости постепенно улучшается: ряд сервисных компаний разрабатывают «зеленые» составы на основе биоразлагаемых компонентов. Например, некоторые гели делают на основе гуаровой камеди (пищевая добавка), биоциды заменяют на ультрафиолетовую обработку воды, снижают долю соляной кислоты. Чем меньше токсичность реагентов — тем меньше потенциальный ущерб при утечке. Прозрачность информации также играет роль: инициатива FracFocus (США) публикует перечень химикатов по каждой скважине, стимулируя компании убирать ненужные опасные добавки.

- Жесткое регулирование и ответственность. Необходим комплексный государственный надзор: лицензирование ГРП должно сопровождаться экологической экспертизой, установлением зон отчуждения (например, запрет на проведение ГРП ближе определенной дистанции от источников питьевой воды). Законы должны обязывать компании восстанавливать нарушенные земли, контролировать выбросы и отчитываться о всех инцидентах. В случае загрязнения — обеспечивать очистку и компен-

сацию ущерба. Международный опыт показывает, что пробелы в регулировании приводят к злоупотреблениям: например, по данным ЕРА, в некоторых штатах США долгое время отсутствовали строгие требования и инциденты должным образом не расследовались. Только ввод обязательных стандартов и штрафных санкций гарантирует приоритет экологии над сиюминутной выгодой.

- Применение мер на практике. Уже сегодня есть позитивные примеры. В Канаде разработан комплексный подход к выбору участков под ГРП с учетом сейсмических факторов: анализ давления, дистанции до фундамента и разломов позволил определить «безопасные» зоны, где успешно проведены разрывы без существенных событий. В США большинство операторов перешло на замкнутые системы сбора отходов вместо земляных амбаров, резко снизив число утечек. Повсеместно внедряется мониторинг: и сейсмостанции, и контроль воды, и измерение воздуха (с участием местных сообществ и ученых). Эти шаги помогают раннему обнаружению проблем и предотвращению их развития.

Наконец, важно отметить, что повышение экологической безопасности ГРП часто ведет и к экономическим выгодам для компаний. Например, улавливание метана означает дополнительный товарный газ на продажу; повторное использование воды экономит средства на заборе и утилизации; предотвращение аварий избавляет от затрат на ликвидацию и штрафов.

Таким образом, экологизация технологий фрекинга соответствует принципам устойчивого развития и выгодна

всем сторонам — и природе, и бизнесу, и населению.

Заключение

Гидроразрыв пласта остается ценным инструментом добычи углеводородов, однако сопряжен с рядом экологических рисков. На основе обзора исследований можно сделать вывод, что при недостаточном контроле фрекинг способен вызвать локальные негативные эффекты: утечку метана в питьевую воду, загрязнение поверхностных вод солями и химикатами, индукцию сейсмических событий, выброс парниковых и токсичных газов. Тем не менее, современные научные подходы и инженерные решения предоставляют возможности минимизировать эти риски до приемлемого уровня. Ключевыми условиями являются: неукоснительное соблюдение технологий изоляции скважин, ответственное водопользование и утилизация отходов, постоянный экологический мониторинг, готовность немедленно реагировать на отклонения, а также жесткие нормы и прозрачность информации.

Выполнение перечисленных мер уже позволило снизить частоту инцидентов в передовых нефтегазодобывающих регионах. Дальнейшее совершенствование техники (например, альтернативные методы разрыва без воды, новые экологичные реагенты) и расширение научных знаний о геологических и экологических процессах дадут возможность еще больше смягчить воздействие ГРП. В итоге грамотное сочетание добычи ресурсов с охраной природы поможет обеспечить как энергетические потребности общества, так и сохранность окружающей среды для будущих поколений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Portnov V., Mindubayev A., Golik A., Suleimenov N., Zakharov A., Madisheva R., Kolikov K., Imanbaeva S. Risk assessment of sudden coal and gas outbursts based on 3D modeling of coal seams

and integration of gas-dynamic and tectonic parameters // *Fire*. 2025, vol. 8, no. 6, article 234. DOI: 10.3390/fire8060234.

2. *Zhai L., Xun Y., Liu H., Qi Bo, Wu J., Wang Ya., Chen Ch.* An investigation of hydraulic fracturing initiation and location of hydraulic fracture in perforated oil shale formations // *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 4196. DOI: 10.1038/s41598-025-88774-y.

3. *Zeng F., Du X., Guo J., Zhang Yu., Chen Zh.* Fracturing pressure prediction model based on temporal and spatial feature fusion in hydraulic fracturing // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2025. DOI: 10.1007/s00603-025-04783-3.

4. *Batugin A., Kobylnin A., Kolikov K., Ivannikov A., Musina V., Khotchenkov E., Zunduijams B., Ertuganova E., Krasnoshtanov D.* Study of the migrating mine gas piston effect during reactivation of tectonic faults // *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 21, article 12041. DOI: 10.3390/app132112041.

5. *Chen F., Wei D., Shi B., Gao Ch., Liu Y., Li B., Wang Zh.* Fracture initiation and propagation in hydraulic fracturing of tight reservoirs // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2025. DOI: 10.1007/s10553-025-01942-8.

6. *Yan J., Song X.* Experimental analysis of hydraulic fracturing for fracture network formation in coal beds // *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 21440. DOI: 10.1038/s41598-025-06745-9.

7. *Faisal Ur Rahman Awan, Alireza Keshavarz, Hamed Akhondzadeh, Sarmad Al-Anssari, Ahmed Al-Yaseri, Ataollah Nosrati, Muhammad Ali, Stefan Iglauer* Stable dispersion of coal fines during hydraulic fracturing flowback in coal seam gas reservoirs – An experimental study // *Energy & Fuels*. 2020, vol. 34, no. 5, pp. 5566–5577. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c00045.

8. *Wu J., Zhang Sh., Cao H., Zheng M., Qu F., Peng C.* Experimental investigation of crack dynamic evolution induced by pulsating hydraulic fracturing in coalbed methane reservoir // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020, vol. 75, article 103159. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103159.

9. *Lu S., Wang S., Liu H., Li R., Dong Q., Xiao Y., Shen P.* Analysis of the influence of natural fracture system on hydraulic fracture propagation morphology in coal reservoir // *Journal of the China Coal Society*. 2020, vol. 45, no. 7, pp. 2590–2601. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.DZ20.0859.

10. *Tong L., Liu D.* A review of environmental issues caused by hydraulic fracturing of shale gas // *Discover Applied Sciences*. 2025, vol. 7, article 588. DOI: 10.1007/s42452-025-07122-x.

11. *Zhao K., Liu C., Hua Y., Feng Ya., Sun X., Zhang C.* Permeability enhancement simulation of hydraulic fracturing in underlying coal seams in goaf // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2025, vol. 11, article 86. DOI: 10.1007/s40948-025-01016-3.

12. *Вознесенский А. С., Кидима-Мбомби Л. К.* Формирование синтетических структур и текстур горных пород при их моделировании в среде COMSOL Multiphysics // *Горные науки и технологии*. – 2021. – Т. 6. – № 2. – С. 65–72. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-2-65-72.

13. *Akbari A., Karami A., Kazemzadeh Y., Ranjbar A.* Evaluation of hydraulic fracturing using machine learning // *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 26926. DOI: 10.1038/s41598-025-12392-x.

14. *Kang H., Xia Y., Feng M., Lu Ch., Gao F.* Case study of hydraulic fracturing for coal burst risk mitigation // *International Journal of Coal Science & Technology*. 2025, vol. 12, article 61. DOI: 10.1007/s40789-025-00812-2.

15. *Куликова Е. Ю., Сергеева Ю. А.* Концептуальная модель минимизации риска загрязнения водных ресурсов Кемеровской области // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 6-1. – С. 107–118. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-107-118.

16. *Liu J., Yang Z., Yi L., Yi D., Li X.* Coupled thermo-hydro-mechanical cohesive phase-field model for hydraulic fracturing in deep coal seams // *Applied Mathematics and Mechanics*. 2025, vol. 46, pp. 663–682 DOI: 10.1007/s10483-025-3236-7.

17. *Li Z., Luo Z.* Environmental impact of hydraulic fracturing on groundwater by isotope composition and hydrochemistry // *Environmental Earth Sciences*. 2024, vol. 83, article 580 DOI: 10.1007/s12665-024-11868-9.

18. *Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В.* Управление геотехническими рисками в шахтном и подземном строительстве // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2025. – Т. 17. – № 1. – С. 556–563. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-556-563.

19. *Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В.* Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2024. – Т. 16. – № 1. – С. 205–216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

20. Wang H., Li J., Wen M., Zhang Y. Influence of hydraulic fracturing and stress unloading on fracture propagation in deep seam excavation // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2025, vol. 43, article 148. DOI: 10.1007/s10706-025-03112-3.

21. Куликова А. А. Новый подход к оценке выбросов от горных предприятий с учетом углеродного следа // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 825—832. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-825-832.

22. Ren S., Li X., Liang S., Li Zh., Li Ch., Luo H. Three-dimensional collaborative hydraulic fracturing control for thick hard roofs: mechanism, simulation, and field application in Yadian Coal Mine // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2025, vol. 11, article 114. DOI: 10.1007/s40948-025-01033-2. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Portnov V., Mindubayev A., Golik A., Suleimenov N., Zakharov A., Madisheva R., Kolikov K., Imanbaeva S. Risk assessment of sudden coal and gas outbursts based on 3D modeling of coal seams and integration of gas-dynamic and tectonic parameters. *Fire*. 2025, vol. 8, no. 6, article 234. DOI: 10.3390/fire8060234.

2. Zhai L., Xun Y., Liu H., Qi Bo, Wu J., Wang Ya., Chen Ch. An investigation of hydraulic fracturing initiation and location of hydraulic fracture in perforated oil shale formations. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 4196. DOI: 10.1038/s41598-025-88774-y.

3. Zeng F., Du X., Guo J., Zhang Yu., Chen Zh. Fracturing pressure prediction model based on temporal and spatial feature fusion in hydraulic fracturing. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2025. DOI: 10.1007/s00603-025-04783-3.

4. Batugin A., Kobylkin A., Kolikov K., Ivannikov A., Musina V., Khotchenkov E., Zunduijams B., Ertuganova E., Krasnoshtanov D. Study of the migrating mine gas piston effect during reactivation of tectonic faults. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 21, article 12041. DOI: 10.3390/app132112041.

5. Chen F., Wei D., Shi B., Gao Ch., Liu Y., Li B., Wang Zh. Fracture initiation and propagation in hydraulic fracturing of tight reservoirs. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2025. DOI: 10.1007/s10553-025-01942-8.

6. Yan J., Song X. Experimental analysis of hydraulic fracturing for fracture network formation in coal beds. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 21440. DOI: 10.1038/s41598-025-06745-9.

7. Faisal Ur Rahman Awan, Alireza Keshavarz, Hamed Akhondzadeh, Sarmad Al-Anssari, Ahmed Al-Yaseri, Ataollah Nosrati, Muhammad Ali, Stefan Iglauer Stable dispersion of coal fines during hydraulic fracturing flowback in coal seam gas reservoirs — An experimental study. *Energy & Fuels*. 2020, vol. 34, no. 5, pp. 5566–5577. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c00045.

8. Wu J., Zhang Sh., Cao H., Zheng M., Qu F., Peng C. Experimental investigation of crack dynamic evolution induced by pulsating hydraulic fracturing in coalbed methane reservoir. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020, vol. 75, article 103159. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103159.

9. Lu S., Wang S., Liu H., Li R., Dong Q., Xiao Y., Shen P. Analysis of the influence of natural fracture system on hydraulic fracture propagation morphology in coal reservoir. *Journal of the China Coal Society*. 2020, vol. 45, no. 7, pp. 2590–2601. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.DZ20.0859.

10. Tong L., Liu D. A review of environmental issues caused by hydraulic fracturing of shale gas. *Discover Applied Sciences*. 2025, vol. 7, article 588. DOI: 10.1007/s42452-025-07122-x.

11. Zhao K., Liu C., Hua Y., Feng Ya., Sun X., Zhang C. Permeability enhancement simulation of hydraulic fracturing in underlying coal seams in goaf. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2025, vol. 11, article 86. DOI: 10.1007/s40948-025-01016-3.

12. Voznesensky A. S., Kidima-Mbombi L. K. Formation of synthetic structures and textures of rocks when simulating in COMSOL Multiphysics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021, vol. 6, no. 2, pp. 65–72. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-2-65-72.

13. Akbari A., Karami A., Kazemzadeh Y., Ranjbar A. Evaluation of hydraulic fracturing using machine learning. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 26926. DOI: 10.1038/s41598-025-12392-x.

14. Kang H., Xia Y., Feng M., Lu Ch., Gao F. Case study of hydraulic fracturing for coal burst risk mitigation. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2025, vol. 12, article 61. DOI: 10.1007/s40789-025-00812-2.

15. Kulikova E. Yu., Sergeeva Ju. A. Conceptual model for minimizing the risk of water pollution in the Kemerovo region. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 6-1, pp. 107–118. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-107-118.

16. Liu J., Yang Z., Yi L., Yi D., Li X. Coupled thermo-hydro-mechanical cohesive phase-field model for hydraulic fracturing in deep coal seams. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2025, vol. 46, pp. 663–682 DOI: 10.1007/s10483-025-3236-7.

17. Li Z., Luo Z. Environmental impact of hydraulic fracturing on groundwater by isotope composition and hydrochemistry. *Environmental Earth Sciences*. 2024, vol. 83, article 580 DOI: 10.1007/s12665-024-11868-9.

18. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Geotechnical risk management in mine and underground construction. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025, vol. 17, no. 1, pp. 556–563. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-556-563.

19. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geocological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205–216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

20. Wang H., Li J., Wen M., Zhang Y. Influence of hydraulic fracturing and stress unloading on fracture propagation in deep seam excavation. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2025, vol. 43, article 148. DOI: 10.1007/s10706-025-03112-3.

21. Kulikova A. A. A new approach to estimating emissions from mining enterprises, taking into account the carbon footprint. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 4, pp. 825–832. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-825-832.

22. Ren S., Li X., Liang S., Li Zh., Li Ch., Luo H. Three-dimensional collaborative hydraulic fracturing control for thick hard roofs: mechanism, simulation, and field application in Yadian Coal Mine. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2025, vol. 11, article 114. DOI: 10.1007/s40948-025-01033-2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маслов Андрей Михайлович – аспирант,
НИТУ МИСИС, e-mail: maslov99-99@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0003-0323-4072,

Орлов Алексей Станиславович – аспирант,
НИТУ МИСИС, e-mail: alorlov13@gmail.com,
ORCID ID: 0009-0008-4037-4249.

Для контактов: Орлов А.С., e-mail: alorlov13@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.M. Maslov¹, Graduate Student,
e-mail: maslov99-99@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0003-0323-4072,

A.S. Orlov¹, Graduate Student,
e-mail: alorlov13@gmail.com,
ORCID ID: 0009-0008-4037-4249,

¹ NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.S. Orlov, e-mail: alorlov13@gmail.com.

Получена редакцией 22.09.2025; получена после рецензии 28.10.2025; принята к печати 10.12.2025.

Received by the editors 22.09.2025; received after the review 28.10.2025; accepted for printing 10.12.2025.

