





Научная статья

## ГЕОЛОГО-ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА

Дияр К. Бармаков<sup>1\*</sup> , Егор Г. Язиков<sup>2</sup> доктор геолого-минералогических наук 

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан, [diyar.barmakov@gmail.com](mailto:diyar.barmakov@gmail.com) (ДКБ)

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, г.Томск, Россия, [yazikoveg@tpu.ru](mailto:yazikoveg@tpu.ru) (ЕГЯ)

\*Автор корреспонденции: Дияр К. Бармаков [diyar.barmakov@gmail.com](mailto:diyar.barmakov@gmail.com)

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

скважинное выщелачивание, золото, трещиноватость, проницаемость, литология, структурные элементы, геомеханика, гидрогеология, 3D моделирование

### АБСТРАКТ

Целью исследования является комплексная оценка геолого-геомеханических и гидрогеологических условий, определяющих возможность применения технологии скважинного выщелачивания золота (ПСВ) на примере золоторудного месторождения Ашиктас. В рамках работы построены трёхмерные геологические и структурные модели с использованием данных бурения, описаний керна, показателей трещиноватости (RQD) и геостатистического анализа распределения золота, серебра и меди. Особое внимание уделено роли литологии, трещиноватости и тектонических нарушений в формировании зон высокой проницаемости и концентрации полезных компонентов. Установлено, что золото преимущественно приурочено к трещиноватым туфам и зонам разломов, обеспечивающим циркуляцию выщелачивающего раствора, тогда как интрузивные породы выполняют роль природных барьеров. Проведён анализ геомеханических и гидрогеологических факторов, влияющих на фильтрацию растворов и экологические риски. Практическая значимость работы заключается в обосновании применения ПСВ как экономически целесообразного и экологически безопасного метода извлечения золота на месторождениях с аналогичными геолого-структурными условиями.

### По статье:

Получено: 23.10.2025

Пересмотрено: 10.02.2026

Принято: 26.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026

### Для цитирования:

Бармаков Д., Язиков Е. Геолого-геомеханические предпосылки применения скважинного выщелачивания золота // Гидрометеорология и экология, 121 (1), 2026, 60-70.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях истощения традиционных открытых и подземных методов добычи золота возрастают экономические и экологические вызовы, которые требуют внедрения более эффективных, экономичных и экологически безопасных технологий. Скважинное выщелачивание (ПСВ) приобретает всё большую популярность как перспективный метод извлечения золота из сложных и малопроницаемых рудных тел. Этот метод успешно применяется на ряде российских месторождений, таких как Гагарское, Маминское, Долгий Мыс, Верхотурское и Восточно-Семеновское, демонстрируя высокую эффективность при снижении затрат и минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

Месторождение Ашиктас характеризуется уникальным комплексом геологических, литологических и структурных особенностей, создающих благоприятные предпосылки для применения ПСВ. В частности, наличие проницаемых зон, трещиноватых коллекторов и устойчивых геомеханических условий способствуют успешной реализации технологии подземного скважинного выщелачивания.

Цель данной статьи — провести комплексную оценку возможности применения ПСВ на месторождении Ашиктас на основе анализа геолого-структурных и геомеханических параметров, а также рассмотреть технологические и экологические

аспекты внедрения данного метода. Особое внимание уделяется выявлению ключевых факторов, влияющих на эффективность выщелачивания, и оценке потенциальных рисков.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Месторождение Ашиктас расположено в пределах геологической зоны с комплексным строением, включающей эффузивно-вулканогенные комплексы, интрузивные тела и разнообразные тектонические структуры. Оно относится к жильному типу золотоносных месторождений, приуроченных к вулканогенно-осадочным породам мезозойского возраста [1].

Литостратиграфически район характеризуется чередованием вулканогенных туфов, эффузивных пород и интрузивных тел. Вулканогенные туфы представлены преимущественно кислым и промежуточным составом, обладающим развитой пористостью и зональной изменчивостью минерального состава. Эффузивные породы — базальты и андезиты — отличаются высокой трещиноватостью, что способствует формированию гидротермальных каналов.

Интрузивные тела, преимущественно гранитоиды, внедрены в эффузивно-вулканогенный комплекс и играют роль не только литологических барьеров, но и структурных ориентиров, контролирующих развитие рудных жил. Их плотность и малая проницаемость ограничивают распространение гидротермальных растворов.

Тектонически месторождение характеризуется сложной системой разломов и взбросов, среди которых Ашиктасский взброс является одной из ключевых структур. Эта зона нарушений создает сеть трещиноватых разломных зон, которые служат основными проводниками для миграции минерализующих флюидов. Наличие активной тектоники обуславливает развитие гидротермальных систем и концентрирует рудные тела в зонах пересечений и изгибов структур.

Минерализация представлена главным образом золотом, с сопряженным содержанием серебра и меди. Золото локализовано в кварцевых жилах, трещинах и петрогенных изменениях вулканогенных пород. Серебро и медь ассоциированы с сульфидными минералами, такими как пирит, халькопирит и сфалерит, локализованными преимущественно в зонах активной трещиноватости [2]-[5].

Гидротермальные процессы, обусловленные циркуляцией металлонесных растворов, приводят к интенсивной перестройке минералогического состава пород в пределах рудных зон. Происходит формирование зон альбитизации, серицитизации, кварцитизации и пиритизации, что служит индикатором локализации и интенсивности минерализации.

Таким образом, комплексная геологическая структура, литологическое разнообразие и выраженная тектоника создают благоприятные предпосылки для формирования обширных зон рудоносности и, одновременно, обуславливают сложность процессов миграции и осаждения металлов в пределах месторождения Ашиктас.

В целях оценки возможности эффективного использования технологии скважинного выщелачивания золота (ПСВ) на месторождении Ашиктас была проведена комплексная интеграция геологических, структурных и геомеханических данных. В исследовании учитывались литологические характеристики, индекс дробления породы (RQD), структурные модели, а также пространственное распределение золота, серебра и меди (Au, Ag, Cu).

Литологическая характеристика и роль пород в миграции флюидов. В пределах изучаемой территории выделяются две основные группы горных пород, которые по-разному влияют на процессы движения и накопления гидротермальных растворов, что обусловлено их структурно-литологическими особенностями.

Эффузивные породы представляют собой вулканические лавы с изменчивой степенью трещиноватости, напрямую зависящей от локальной геологии и близости к крупным

разломам. В участках с высокой трещиноватостью (низкие значения RQD свидетельствуют о высокой степени дробления) такие породы образуют разветвленные трещинные сети, служащие эффективными каналами для движения выщелачивающих растворов. Это обеспечивает их активное взаимодействие с минерализованными телами и способствует максимальному извлечению металлов. В более цельных (высокий RQD) зонах проницаемость эффузивов значительно снижается, ограничивая циркуляцию растворов. Данный факт подчеркивает необходимость детального учета локальной неоднородности проницаемости при моделировании процесса выщелачивания.

Туфы как аккумуляторы минерализующих растворов. В отличие от эффузивных пород, туфы — осадочные вулканогенные породы — характеризуются высокой пористостью и относительно низкой трещиноватостью. Их поровое пространство способствует накоплению и удержанию минерализующих растворов, замедляя их движение. Это создает благоприятные условия для отложения рудных минералов в порах и мелких пустотах, что позволяет туфам выполнять функцию природных коллекторов, аккумулирующих полезные компоненты. Эффективное моделирование миграции и накопления растворов возможно лишь при комплексном учете литологии и локальных геоструктурных особенностей, определяющих проницаемость и степень трещиноватости [9]-[13].

В данной работе моделирование трещиноватости базируется на использовании геотехнического показателя RQD (Rock Quality Designation), введенного исследователем Диром в рамках более широкой системы оценки качества горной массы — RMR (Rock Mass Rating). RQD отражает качество горной породы и определяется как отношение суммарной длины керновых образцов длиной более 10 см к общей длине отобранного керна из геологоразведочных скважин. Этот показатель широко применяется для оценки степени трещиноватости массива, поскольку наличие трещин и зон разрушения оказывает существенное влияние на геотехнические и гидрогеологические процессы. Высокие значения RQD указывают на относительно цельные и неповрежденные породы, тогда как низкие значения свидетельствуют о значительном разрушении и развитии трещиноватости [14]-[17].

Анализ качества горных пород по индексу RQD показал, что в районах, приуроченных к рудным телам и крупным разломным структурам, отмечается значительная трещиноватость пород. Низкие значения RQD указывают на развитую сеть трещин, что создаёт благоприятные условия для равномерного проникновения выщелачивающих растворов и их эффективного контакта с рудой.

Структурная модель месторождения выявила множество разломов, взбросов и зон сдвигов различного масштаба. Особое значение для формирования гидродинамических условий имеет Ашиктасский взброс — крупный сдвиговой разлом, усиливающий трещиноватость и выступающий в роли главного проводника миграции минерализующих растворов. Данная сеть структурных нарушений формирует сложную систему трещин, по которым обеспечивается циркуляция выщелачивающих жидкостей, создавая оптимальные условия для ин-ситу извлечения золота и сопутствующих металлов.

Проницаемость и степень трещиноватости являются ключевыми параметрами, влияющими на распределение рудных минералов. Интенсивная трещиноватость, особенно вблизи структурных разломов, формирует сети гидродинамических каналов, по которым гидротермальные растворы, обогащенные Au, Ag и Cu, перемещаются и концентрируются. В местах с низкой проницаемостью — преимущественно в туфах — замедленное движение растворов способствует локализации руды и более интенсивному осаждению минералов.

Взаимодействие литологических особенностей и тектонических структур формирует сложную пространственную схему распределения полезных компонентов.

В геологической структуре месторождения явно выраженных гидрогеологических барьеров — таких как плотные интрузивные тела с низкой проницаемостью — не выяв-

лено. Возможные барьеры в виде глинистых слоев наблюдаются лишь в верхних горизонтах и не охватывают основные рудные зоны. Это указывает на необходимость тщательного контроля технологических параметров скважинного выщелачивания с целью минимизации неконтролируемого распространения выщелачивающих растворов за пределы целевых рудных зон.

Пространственное распределение золота, серебра и меди. Моделирование в трех измерениях показало, что наиболее богатые концентрации золота, серебра и меди приурочены к зонам трещиноватых эффузивных пород и разломных систем. Такие зоны создают оптимальные гидродинамические условия для циркуляции растворов и их контакта с минералами, что обеспечивает эффективное выщелачивание.

Высокая трещиноватость эффузивов способствует проникновению реагентов, тогда как пористые туфы обеспечивают задержку и аккумуляцию растворов, создавая благоприятные условия для извлечения полезных компонентов.

Прочностные свойства пород в зоне выщелачивания являются критическими для поддержания стабильности скважин и предотвращения деформаций. Породы месторождения Ашиктас характеризуются средней прочностью и умеренной устойчивостью, что обеспечивает сохранность горных массивов в процессе длительной циркуляции растворов. Тем не менее, для минимизации рисков рекомендуется проводить постоянный геомеханический мониторинг с целью выявления зон потенциальной нестабильности.

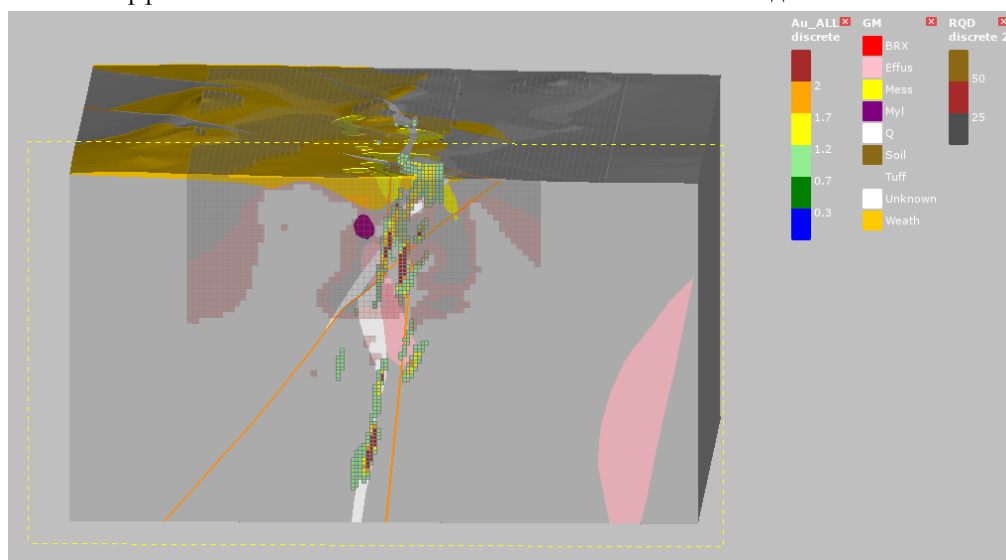
Высокая трещиноватость пород способствует эффективному фильтрационному проникновению растворов. Однако чрезмерное дробление пород может привести к неконтролируемому распространению выщелачивающих жидкостей за пределы рудных тел, снижая эффективность процесса и повышая экологические риски. Поэтому контроль степени трещиноватости и параметров фильтрации является важным аспектом эксплуатации.

Гидрогеологические условия и их значение. Водоносные горизонты, расположенные вблизи или внутри выщелачиваемой зоны, оказывают существенное влияние на движение растворов. Вода может менять гидравлические градиенты, способствуя непредсказуемому вытеканию реагентов и потенциальному загрязнению окружающей среды. На месторождении Ашиктас отсутствуют выраженные гидрогеологические барьеры, способные ограничить распространение растворов, а глинистые слои, которые могли бы выполнять эту функцию, локализируются только в верхних горизонтах, не затрагивая основные рудные тела.

Для минимизации экологических рисков необходима разработка комплексной системы гидроизоляции, включая мониторинг уровней подземных вод и контроль фильтрации выщелачивающих растворов.

Опыт применения скважинного выщелачивания золота на аналогичных месторождениях России, таких как Гагарское, Маминское, Долгий Мыс, Верхотурское и Восточно-Семеновское, демонстрирует, что успешность данной технологии во многом зависит от комплекса геолого-структурных и гидродинамических факторов. Важнейшими из них являются наличие пород-проводников с высокой трещиноватостью и проницаемостью, обеспечивающих свободную циркуляцию выщелачивающих растворов, а также присутствие пород-коллекторов, обладающих значительной пористостью, способствующей аккумуляции и удержанию реагентов в пределах целевых зон. Немаловажную роль играют природные или искусственно создаваемые барьеры, которые препятствуют неконтролируемому распространению растворов за пределы рудных тел, тем самым повышая эффективность выщелачивания и снижая экологические риски. Кроме того, практика успешных проектов подчеркивает необходимость внедрения систем геомеханического и гидрогеологического мониторинга, а также мер гидроизоляции, которые обеспечивают стабильность горных массивов и контролируют фильтрационные потоки, что в итоге способствует безопасности и долговременной устойчивости технологии [6]-[8].

Выводы, сформулированные на основании интегрированного анализа геолого-структурных и гидрогеологических данных, свидетельствуют о том, что высокая трещиноватость и пористость пород-проводников создают благоприятные условия для эффективного проникновения и циркуляции выщелачивающих растворов, что является ключевым для максимального извлечения золота и сопутствующих металлов. Пористые туфы, в свою очередь, выступают в роли коллекторов, способствуя локализации минерализации и осаждению рудных компонентов в пределах пространств порового и микропорового типа. Отсутствие выраженных природных гидрогеологических барьеров в пределах рудного тела месторождения Ашиктас требует разработки дополнительных инженерных мер, направленных на контроль фильтрации и предотвращение нежелательного распространения реагентов. При этом геомеханические свойства вмещающих пород обеспечивают достаточную устойчивость массива, что при условии постоянного мониторинга позволяет минимизировать риски обрушений и деформаций в зоне выщелачивания. Таким образом, комплексный подход, основанный на учёте геологических, структурных, геомеханических и гидрогеологических факторов, подтверждает готовность месторождения Ашиктас к успешному применению технологии скважинного выщелачивания золота с высокой эффективностью и минимальными экологическими последствиями.



**Рисунок 1.** Литологическая модель, модель содержания меди (Cu), модель разломов, а также модель трещиноватости (RQD) в разрезе (ПО Leapfrog Geo)

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования для оценки возможности применения технологии скважинного выщелачивания золота (ПСВ) на месторождении Ашиктас был проведён комплексный анализ геомеханических, гидрогеологических и литологических характеристик массива. Для более детального понимания пространственной организации и особенностей горных пород, а также их влияния на циркуляцию выщелачивающих растворов, были построены и интегрированы несколько трёхмерных моделей.

В первую очередь была создана литологическая модель, которая позволила выделить ключевые типы пород, влияющих на миграцию и аккумуляцию минерализующих флюидов. Эта модель стала основой для дальнейшего построения и интерпретации данных. Одновременно были сформированы модели распределения золота, серебра и меди, что обеспечило пространственное понимание концентрации и локализации полезных компонентов. Особое внимание уделялось оценке индекса трещиноватости (RQD), по которому была построена модель, отражающая степень разрушенности и проницаемости горных пород. Дополнительно была разработана структурная модель с выделением разломов и крупных тектонических элементов, таких

как Ашиктасский взброс, оказывающих существенное влияние на миграционные пути флюидов.

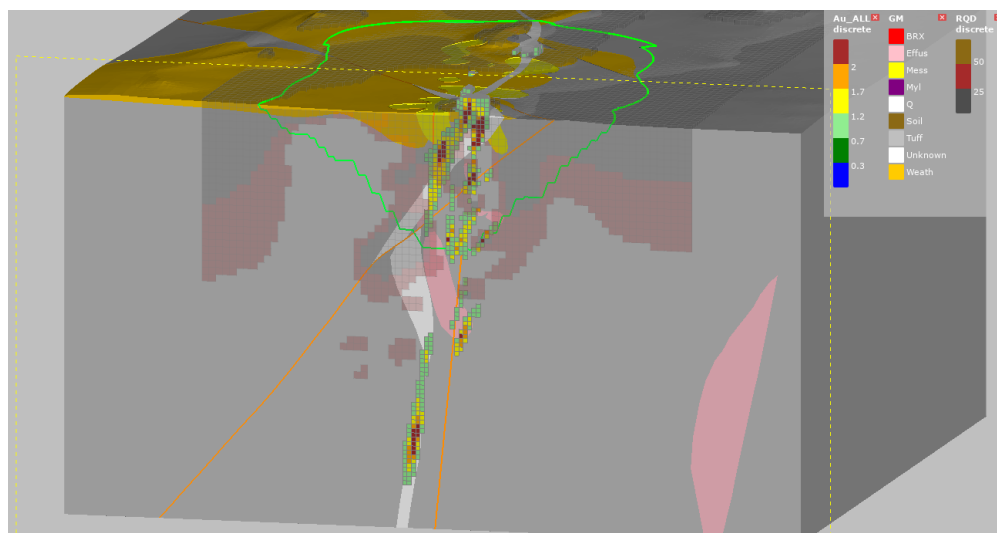
Объединение всех этих моделей позволило визуализировать потенциальные каналы миграции золотоносных растворов, определить зоны с высокой проницаемостью и трещиноватостью, а также выявить возможные гидродинамические барьеры и локализации минерализации. Это, в свою очередь, стало основой для предварительной оценки возможности и эффективности применения ПСВ на данном месторождении.

Результаты моделирования показали, что высокая трещиноватость и проницаемость в туфах и эффузивных породах обеспечивают благоприятные условия для циркуляции выщелачивающих растворов, что позитивно сказывается на извлечении золота и сопутствующих металлов. Однако выявленные структурные особенности и наличие водоносных горизонтов вблизи минерализованных зон требуют более детального изучения, так как возможны риски неконтролируемого распространения растворов и выноса реагентов за пределы целевых зон. В частности, не до конца изучена гидрогеологическая связь водоносных горизонтов с близлежащими поверхностными водными объектами, такими как реки и озера, что может существенно повлиять на экологическую обстановку региона при реализации технологии.

Кроме того, геомеханический анализ пород показал средний уровень прочности и умеренную устойчивость, что создаёт благоприятные условия для сохранения стабильности скважинных каналов в зоне выщелачивания. Вместе с тем, полученные данные указывают на необходимость организации регулярного мониторинга и проведения дополнительных исследований геомеханических характеристик в процессе эксплуатации, чтобы своевременно выявлять и предотвращать потенциальные зоны нестабильности.

Комплексное моделирование и интеграция геологических, структурных и гидрогеологических данных позволили сформировать целостное представление о геологическом строении и гидродинамических условиях месторождения Ашиктас. Эти результаты служат важной основой для принятия обоснованных решений по применению технологии скважинного выщелачивания золота, позволяя заранее определить потенциальные трудности и зоны риска, а также обозначить направления для дальнейших исследований и усовершенствований проекта. В частности, рекомендуется уделить особое внимание изучению гидрогеологической связи водоносных горизонтов с поверхностными водами и внедрению систем гидроизоляции и контроля фильтрационных потоков для минимизации экологических рисков и повышения эффективности технологии.

На рисунке 2 обозначены литологическая модель, блочная модель содержания золота Au, полупрозрачным отображена модель RQD со значениями «очень слабых» (от 0 до 25 красным цветом) и «слабых» пород (от 25 до 50 черным цветом), зеленой линией изображены границы планируемой открытой отработки месторождения. Ниже указанной границы имеются значительные запасы руды, которые требуют рассмотрения различных вариантов отработки с расчетом рентабельности.



**Рисунок 2.** Литологическая модель, модель содержания меди (Cu), модель разломов, а также модель трещиноватости (RQD) в разрезе (ПО Leapfrog Geo)

Предпосылки для применения технологии скважинного выщелачивания (ПСВ) на месторождении Ашиктас во многом сходны с условиями, успешно реализованными на таких известных объектах, как Гагарское, Маминское и Верхотурское месторождения. Ключевыми факторами успеха на этих площадках стали комплекс литологических особенностей, высокий уровень трещиноватости пород, наличие структурных разломов, формирующих эффективные пути миграции растворов, а также благоприятные гидрогеологические условия, обеспечивающие контроль движения выщелачивающих растворов и минимизацию экологических рисков. Литологический состав и структурные элементы месторождения Ашиктас создают потенциал для формирования замкнутых зон выщелачивания, что крайне важно для ограничения неконтролируемой фильтрации и сохранения реагентов в целевых минерализованных зонах. Высокий индекс трещиноватости (RQD) в порах и вдоль разломных зон способствует равномерному проникновению выщелачивающего раствора, что положительно влияет на эффективность извлечения золота. Анализ геомеханических характеристик пород показывает достаточную устойчивость выработанных пространств, обеспечивающую безопасность проведения ПСВ.

Тем не менее, все сделанные выводы основаны на данных компьютерного моделирования, геологического и геомеханического анализа, а не на результатах реальных полевых испытаний. Это накладывает ограничения на точность прогноза, так как безполевых экспериментов невозможно полноценно оценить динамику движения растворов, скорость извлечения металлов и возможные экологические последствия. В частности, неопределённость в структуре водоносных горизонтов, а также возможная гидрогеологическая связь с близлежащими поверхностными водными объектами требует проведения дополнительного детального гидрогеологического картирования. Это позволит уточнить пути миграции подземных вод и разработать мероприятия по гидроизоляции для снижения экологических рисков.

Выбор выщелачивающих реагентов играет важную роль в обеспечении эффективности и безопасности технологии. На месторождении Ашиктас предпочтение отдается цианистым растворам — проверенному и широко используемому в России реагенту, который характеризуется высокой селективностью и скоростью извлечения золота. Вместе с тем, учитывая растущие требования к экологической безопасности, целесообразно рассмотреть менее токсичные альтернативы, такие как тиомочевина, персульфаты, хелатообразующие агенты и биохимические реагенты. Их применение позволит снизить экологическую нагрузку и минимизировать риски, связанные с обращением отходов и взаимодействием с подземными водами.

Основные технологические сложности связаны с потенциальным разубоживанием выщелачивающего раствора при контакте с горными породами, что ведет к снижению концентрации активного реагента и уменьшению эффективности извлечения металлов. Неконтролируемая фильтрация растворов через трещиноватые породы или гидрогеологические каналы может привести к значительным потерям реагентов и загрязнению окружающей среды. Для минимизации этих рисков необходимо разработать комплексную систему гидроизоляции, включающую создание барьерных зон, цементационных экранов и использование геотекстильных материалов. При этом особое значение приобретает организация постоянного мониторинга качества подземных вод и состояния выщелачивающей среды посредством гидрогеохимических исследований, регулярного отбора проб и анализа концентраций реагентов и металлов. Контроль параметров рН, окислительно-восстановительного потенциала и содержания токсичных соединений в подземных водах позволит своевременно выявлять аномалии и предотвращать неконтролируемое загрязнение.

Экологическая безопасность выступает приоритетом при внедрении ПСВ на месторождении Ашиктас. Для снижения рисков загрязнения подземных водных горизонтов необходимо предусмотреть гидроизоляционные мероприятия, такие как создание защитных экранов и использование запирающих пород. Строгое соблюдение законодательных требований и нормативов по обращению с опасными веществами, регулярное обучение персонала и проведение экологических аудитов станут важной частью комплексного управления экологическими рисками.

Опыт успешного применения ПСВ на Верхотурском и Восточно-Семеновском месторождениях демонстрирует, что при правильной организации технологических и экологических мероприятий возможно значительно снизить негативное воздействие, повысить безопасность и экономическую эффективность добычи. В связи с этим дальнейшие этапы исследований на Ашиктасе должны включать проведение пилотных скважинных выщелачиваний для верификации эффективности и выявления технических ограничений, детальное гидрогеологическое картирование, разработку и внедрение систем экологического мониторинга, а также исследования по подбору и оптимизации реагентов с учетом геохимических особенностей месторождения и минимизации экологического воздействия [6]-[8].

Таким образом, интеграция результатов моделирования с опытом аналогичных проектов и вниманием к экологическим аспектам позволяет рассматривать месторождение Ашиктас как перспективную площадку для успешного применения технологии скважинного выщелачивания золота, способствующего повышению экономической эффективности добычи при минимальных экологических рисках.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Скважинное выщелачивание (ПСВ) рассматривается как перспективный и эффективный метод добычи золота на месторождении Ашиктас благодаря совокупности благоприятных геолого-структурных, геомеханических и гидрогеологических условий. Высокая трещиноватость и развитая пористость туфов, а также наличие протяженных разломных зон с повышенной проницаемостью создают оптимальные пути для циркуляции выщелачивающего раствора и обеспечивают эффективное извлечение золота ин-ситу. Наиболее перспективными для применения ПСВ выделены именно участки трещиноватых туфов и разломов, где наблюдается высокая концентрация золота и одновременно благоприятные условия для фильтрации, что способствует максимальному контакту реагентов с минералами и контролю над процессом выщелачивания.

Одним из ключевых условий успешной реализации технологии является тщательный учет гидрогеологических особенностей месторождения. Необходима разработка комплексных систем гидроизоляции и контроля движения подземных вод с целью

предотвращения неконтролируемого распространения растворов и минимизации экологических рисков, связанных с загрязнением водоносных горизонтов и близлежащих поверхностных водных объектов.

Для практического внедрения ПСВ на Ашиктасе рекомендуется проведение полевых пилотных испытаний, которые позволят подтвердить прогнозные оценки, оптимизировать технологические параметры и выявить возможные технические и экологические ограничения. В дальнейшем целесообразно осуществлять гидрогеохимический мониторинг, проводить комплексные исследования по подбору и оптимизации выщелачивающих реагентов с учетом специфики месторождения, а также разрабатывать и внедрять системы экологической безопасности.

В целом, применение скважинного выщелачивания на месторождении Ашиктас обладает высоким потенциалом для повышения экономической эффективности добычи золота при одновременном снижении негативного воздействия на окружающую среду. Такой подход отвечает современным требованиям устойчивого развития горнодобывающей отрасли и способствует внедрению инновационных и экологически ответственных технологий в отечественную практику.

#### **ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ**

Данные, использованные в данном исследовании, получены авторами в ходе полевых и камеральных исследований на месторождении Ашиктас, а также из открытых источников.

#### **ВКЛАД АВТОРОВ**

Концептуализация - ЕГЯ, ДКБ; управление данными - ДКБ; формальный анализ - ДКБ; методология - ДКБ; программное обеспечение - ДКБ; отслеживание - ЕГЯ; Визуализация - ДКБ; написание исходного проекта - ДКБ; написание и редактирование обзора - ДКБ, ЕГЯ.

#### **БЛАГОДАРНОСТЬ**

Авторы выражают искреннюю благодарность редактору и анонимным рецензентам за их содержательные замечания и ценные предложения, которые существенно повысили качество данной рукописи.

#### **ФИНАНСИРОВАНИЕ**

Исследование выполнено без привлечения внешних источников финансирования.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Черненко З.И., Матайбаева И.Е. Промышленные типы месторождений полезных ископаемых: Учеб. пособие (курс лекций). – Алматы: Бастау, 2019
2. Авдонин В.В., Мосейкин В.В., Мельников М.Е. Геология и разведка месторождений полезных ископаемых. – Москва: Академия, 2011
3. Аношин Г.Н. Химический анализ в геологии и геохимии. – Новосибирск: GEO, 2016.
4. Стримжа Т.П. Прикладная геохимия. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015.
5. Старостин В.И., Игнатов П.А. Геология полезных ископаемых: Учебник для высшей школы. Москва: Академия, 2017.
6. Фазлуллин М.И., Шаталов В.В., Авдонин Г.И., Смирнова Р.Н., Ступин В.И. Подземное выщелачивание урана, золота и других металлов. Москва: Руда и металлы, 2005.
7. Низамутдинова Н. Р., Кутлиахметов А. Н., Шайдулина Г. Ф., Сафарова В. И., Докукин Ю. В. Оценка воздействия технологии подземного выщелачивания золота на окружающую среду. Москва: Вода: химия и экология, 2014.
8. Заболотский А. И., Харькевич К. А., Видусов Т. Э. Опытные испытания способа ПВ для добычи золота из руд коры выветривания золоторудного месторождения Гагарского. Москва: ГИАБ, 1999.
9. Cooke D. R., Simmons S.F. Characteristics and Genesis of Epithermal Gold Deposits. Littleton, USA.: Society of Economic Geologists, 2000.
10. Mériaud, N., Masurel, Q., Thébaud, N., Tourigny, G. Fluid pressure–dominated orogenic gold mineralization under low differential stress: case of the Yaouré gold camp, Côte d’Ivoire, West Africa. Basel, Switzerland: Mineralium Deposita, 2022.
11. Doe A., Lee B. Fluid pressure–dominated orogenic gold mineralization under low differential stress: case of the Yaouré gold camp, Côte d’Ivoire, West Africa. Basel, Switzerland: Springer, 2022.
12. Zhang X., Wang Y. Three-Dimensional Mineral Prospectivity Modeling for the Xiadian Orogenic Gold Deposit, China. Basel, Switzerland: Minerals, 2019.

13. Liu M., Chen Q. 3D Mineral Prospectivity Modeling for the Low-Sulfidation Epithermal Gold Deposit: A Case Study of the Axi Gold Deposit. Basel, Switzerland: Minerals, 2021.
14. Reid D., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. Melbourne, Australia: CSIRO Publishing.
15. GOST 25100-2020 Grunty. Klassifikatsiya. Moscow: Rosstandart, 2009.
16. Beniaowski Z.T. Engineering rock mass classification. New York: John Wiley & Sons, 1989.
17. Korchak S.A. Otsenka sostoyaniya massiva gornykh porod dlya vydeleniya potentsial'no opasnykh uchastkov proektiruемого kar'era. Yekaterinburg: Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta, 2022.

## REFERENCES

1. Chernenko Z.I., Matajbaeva I.E. Promyshlennyye tipy mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh: Ucheb. posobie (kurs lekcij). – Almaty: Bastau, 2019
2. Avdonin V.V., Mosejkin V.V., Mel'nikov M.E. Geologiya i razvedka mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh. – Moskva: Akademiya, 2011
3. Anoshin G.N. Himicheskij analiz v geologii i geohimii. – Novosibirsk: GEO, 2016.
4. Strimzha T.P. Prikladnaya geohimiya. Krasnoyarsk: Sibirskij federal'nyj universitet, 2015.
5. Starostin V.I., Ignatov P.A. Geologiya poleznykh iskopaemykh: Uchebnik dlya vysshej shkoly. Moskva: Akademiya, 2017.
6. Fazlullin M.I., SHatalov V.V., Avdonin G.I., Smirnova R.N., Stupin V.I. Podzemnoe vyshchelachivanie urana, zolota i drugih metallov. Moskva: Ruda i metally, 2005.
7. Nizamutdinova N. R., Kutliahmetov A. N., SHajdulina G. F., Safarova V. I., Dokukin YU. V. Ocenka vozdejstviya tekhnologii podzemnogo vyshchelachivaniya zolota na okruzhayushchuyu sredu. Moskva: Voda: himiya i ekologiya, 2014.
8. Zabolockij A. I., Har'kevich K. A., Vidusov T. E. Opytnye ispytaniya sposoba PV dlya dobychi zolota iz rud kory vyvetrivaniya zolotorudnogo mestorozhdeniya Gagarskogo. Moskva: GIAB, 1999.
9. Cooke D. R., Simmons S.F. Characteristics and Genesis of Epithermal Gold Deposits. Littleton, USA: Society of Economic Geologists, 2000.
10. Mériaud, N., Masurel, Q., Thébaud, N., Tourigny, G. Fluid pressure–dominated orogenic gold mineralization under low differential stress: case of the Yaouré gold camp, Côte d'Ivoire, West Africa. Basel, Switzerland: Mineralium Deposita, 2022.
11. Doe A., Lee B. Fluid pressure–dominated orogenic gold mineralization under low differential stress: case of the Yaouré gold camp, Côte d'Ivoire, West Africa. Basel, Switzerland: Springer, 2022.
12. Zhang X., Wang Y. Three-Dimensional Mineral Prospectivity Modeling for the Xiadian Orogenic Gold Deposit, China. Basel, Switzerland: Minerals, 2019.
13. Liu M., Chen Q. 3D Mineral Prospectivity Modeling for the Low-Sulfidation Epithermal Gold Deposit: A Case Study of the Axi Gold Deposit. Basel, Switzerland: Minerals, 2021.
14. Reid D., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. Melbourne, Australia: CSIRO Publishing.
15. GOST 25100-2020 Grunty. Klassifikatsiya. Moscow: Rosstandart, 2009.
16. Beniaowski Z.T. Engineering rock mass classification. New York: John Wiley & Sons, 1989.
17. Korchak S.A. Otsenka sostoyaniya massiva gornykh porod dlya vydeleniya potentsial'no opasnykh uchastkov proektiruемого kar'era. Yekaterinburg: Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta, 2022.

## АЛТЫНДЫ СҚВАЖИНАЛЫҚ ШАЙМАЛАУ ӘДІСІН ҚОЛДАНУДЫҢ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ-ГЕОМЕХАНИКАЛЫҚ НЕГІЗДЕМЕЛЕРІ

Дияр К. Бармаков<sup>1\*</sup>, Егор Г. Язиков<sup>2</sup> Геология-минералогия ғылымдарының докторы

Автор(лар)дың негізгі жұмыс орны, мекен-жайы; e-mail (А.Ә.Т.)

<sup>1</sup>Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан, [diyar.barmakov@gmail.com](mailto:diyar.barmakov@gmail.com) (ДКБ)

<sup>2</sup>Томск политехникалық университеті, Томск қ., Ресей, [yazikov@tpu.ru](mailto:yazikov@tpu.ru) (ЕГЯ)

\*Автор корреспондент: Дияр К. Бармаков [diyar.barmakov@gmail.com](mailto:diyar.barmakov@gmail.com)

---

**ТҮЙІН СӨЗДЕР**

ұңғымалық шаймалау, алтын, жарықшақтылық, өткізгіштік, литология, құрылымдық элементтер, геомеханика, гидрогеология, 3D модельдеу

**Мақала жайында:**

Алынды: 23.10.2025

Қайта қаралды: 10.02.2026

Қабылданды: 26.03.2026

Жарияланды: 01.04.2026

---

**АБСТРАКТ**

Бұл зерттеудің мақсаты – Ашықтас алтын кен орнында ұңғымалық шаймалау (ин-ситу) технологиясын қолдану мүмкіндігін айқындайтын геологиялық, геомеханикалық және гидрогеологиялық жағдайларды кешенді бағалау. Бұрғылау деректері, өзек сипаттамалары, жыныс сапасының индексі (RQD) және алтын, күміс және мыс таралуының геостатистикалық талдауы негізінде үш өлшемді геологиялық және құрылымдық модельдер жасалды. Литология, жарықшақтылық және әсіресе Ашықтас жарылысы сияқты тектоникалық құрылымдардың өткізгіштігі жоғары аймақтар мен металдар шоғырлануын қалыптастырудағы рөліне ерекше назар аударылды. Алтынның негізінен жарықшақты туфтарда және сілтілік ерітінділердің айналымына қолайлы құрылымдық бұзылыстарда жинақталатыны анықталды, ал интрузивті жыныстар табиғи тосқауылдар қызметін атқарады. Ерітінді фильтрациясына және экологиялық қауіп-қатерлерге әсер ететін геомеханикалық және гидрогеологиялық факторлар да талданды. Зерттеудің практикалық маңыздылығы – ұқсас геологиялық және құрылымдық жағдайлардағы кен орындарында алтын өндірудің тиімді әрі экологиялық қауіпсіз әдісі ретінде ұңғымалық шаймалауды қолдану мүмкіндігін негіздеуінде.

---

## GEOLOGICAL AND GEOMECHANICAL CONDITIONS FOR IMPLEMENTING IN-SITU LEACHING TECHNOLOGY FOR GOLD EXTRACTION

Diyar K.Barmakov<sup>1\*</sup>, Egor G. Yazikov<sup>2</sup> doctor of geological and mineralogical sciences

<sup>1</sup>D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, [diyar.barmakov@gmail.com](mailto:diyar.barmakov@gmail.com) (ДКБ)

<sup>2</sup>Tomsk Politechnic University, Tomsk, Russia, [yazikoveg@tpu.ru](mailto:yazikoveg@tpu.ru) (ЕГЯ)

\*Author correspondent: Diyar K. Barmakov [diyar.barmakov@gmail.com](mailto:diyar.barmakov@gmail.com)

---

**KEY WORDS**

in-situ leaching, gold, fracturing, permeability, lithology, structural features, geomechanics, hydrogeology, 3D modeling

**About article:**

Received: 23.10.2025

Revised: 10.02.2026

Accepted: 26.03.2026

Published: 01.04.2026

---

**ABSTRACT**

The aim of this study is to conduct a comprehensive assessment of geological, geomechanical, and hydrogeological conditions determining the feasibility of applying in-situ gold leaching (ISL) technology at the Ashiktas gold deposit. Three-dimensional geological and structural models were developed based on drilling data, core logging, rock quality designation (RQD) indices, and geostatistical analysis of gold, silver and copper distribution. Special attention was given to the role of lithology, fracturing, and tectonic structures, particularly the Ashiktas fault, in forming zones of high permeability and metal concentration. It was established that gold is mainly associated with fractured tuffs and fault zones that facilitate the circulation of leaching solutions, while intrusive rocks act as natural barriers. Geomechanical and hydrogeological factors affecting solution filtration and environmental risks were also analyzed. The practical significance of this work lies in justifying the use of in-situ leaching as an economically viable and environmentally safe method for gold extraction at deposits with similar geological and structural conditions.

---

**Примечание издателя:** заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).