

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_3_5

МРНТИ 38.49.19

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ЗОЛОТОНОСНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ ДОМЕНОВ И СТЕПЕНИ СТРУКТУРНОЙ НАРУШЕННОСТИ

ЛИТОЛОГИЯЛЫҚ ДОМЕНДЕРГЕ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ БҰЗЫЛУ ДЕҢГЕЙІНЕ ТӘУЕЛДІ АЛТЫНДАНУДЫҢ КЕҢІСТІКТІК ТАРАЛУ ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫ

SPATIAL CONTROL OF GOLD MINERALIZATION IN RELATION TO LITHOLOGICAL DOMAINS AND DEGREE OF STRUCTURAL DISTURBANCE

Д.К. Бармаков ^{1*}, З.И. Черненко ¹, Е.Г. Язиков ²¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан²Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

*Автор-корреспондент: Бармаков Дияр Кайратович, e-mail: diyar.barmakov@gmail.com

Ключевые слова:

гидротермальные
месторождения,
трещиноватость, RQD,
литологические домены,
руда.

АННОТАЦИЯ

В работе выполнен доменный анализ пространственного распределения золота (Au) в пределах золоторудного месторождения Ашиктас на основе литологической сегментации массива и оценки степени его структурной нарушенности. В качестве основы выделения доменов использованы укрупнённые литологические группы, объединённые по обобщённым физико-механическим характеристикам (плотность и пористость), отражающим различия в фильтрационно-ёмкостных свойствах пород. На основе данных бурения и лабораторных исследований построены трёхмерные геологические и блочные модели распределения Au, а также модель показателя RQD, применённого в качестве прокси-индикатора степени трещиноватости массива. Количественная оценка выполнена путём сопоставления доли интервалов различных классов содержания золота с литологическими доменами и значениями RQD. Установлено, что повышенные содержания золота преимущественно локализируются в кварцевых зонах, характеризующихся пониженными значениями RQD, что указывает на ведущую роль структурной переработки массива при формировании золотоносности. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения доменного подхода и количественного сопоставления литологических и структурных факторов для повышения достоверности прогноза рудоносных зон и планирования дальнейших геологоразведочных работ.



© 2026 Д.К. Бармаков, З.И. Черненко, Е.Г. Язиков

Данная работа распространяется на условиях лицензии

Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Түйінді сөздер:

гидротермалық кен
орындары,
жарықшақтылық, RQD,
литологиялық домендер,
кен.

ТҮЙІНДЕМЕ

Жұмыста Ашиктас алтын кен орнында алтынның (Au) кеңістіктік таралуына литологиялық сегментация және жыныс массивінің құрылымдық бұзылу дәрежесін бағалау негізінде домендік талдау жүргізілді. Домендерді бөлу үшін жыныстардың сүзгілік-сыйымдылық қасиеттеріндегі айырмашылықтарды көрсететін жалпыланған физикалық-механикалық сипаттамалар (тығыздық пен кеуектілік) бойынша біріктірілген ірілендірілген литологиялық топтар пайдаланылды. Бұрғылау және зертханалық зерттеулер деректері негізінде Au таралуының үшөлшемді геологиялық және блоктық модельдері, сондай-ақ жыныс массивінің жарықшақтылық дәрежесінің прокси-көрсеткіші ретінде қолданылған RQD моделі құрастырылды. Сандық бағалау алтын құрамының әртүрлі кластарындағы интервалдардың үлесін литологиялық домендермен және RQD мәндерімен салыстыру арқылы орындалды. Зерттеу нәтижелері бойынша алтынның жоғары концентрациялары төмен RQD мәндерімен сипатталатын кварцты аймақтарда шоғырланатыны анықталды, бұл алтынданудың қалыптасуында жыныс массивінің құрылымдық қайта өңделуінің жетекші рөлін көрсетеді. Зерттеудің практикалық маңызы – литологиялық және құрылымдық факторларды сандық салыстыруға негізделген домендік тәсілді қолдану арқылы кенді аймақтарды болжаудың сенімділігін арттыру және әрі қарайғы геологиялық барлау жұмыстарын жоспарлауды жетілдіру мүмкіндігінде.

Keywords:

hydrothermal deposits,
fracturing, RQD,
lithological domains, ore.

ABSTRACT

This study presents a domain-based analysis of the spatial distribution of gold (Au) within the Ashiktas gold deposit, based on lithological segmentation of the rock mass and assessment of its structural disturbance. Domain delineation was grounded on generalized lithological groups integrated according to their physical and mechanical properties (density and porosity), reflecting differences in the filtration and reservoir characteristics of the rocks. Using drilling data and laboratory analyses, three-dimensional geological and block models of Au distribution were constructed, along with a model of the Rock Quality Designation (RQD) index employed as a proxy indicator of fracture intensity within the rock mass. Quantitative evaluation was performed by correlating the proportion of intervals corresponding to different gold grade classes with lithological domains and RQD values. The results demonstrate that elevated gold concentrations are predominantly localized within quartz-rich zones characterized by reduced RQD values, indicating the leading role of structural reworking in gold localization. The practical significance of the study lies in the applicability of the domain approach and quantitative comparison of lithological and structural factors to enhance the reliability of ore zone prediction and to optimize further exploration planning.

ВВЕДЕНИЕ

Пространственная неоднородность распределения золота является характерной особенностью гидротермальных месторождений жильного типа и отражает совокупное влияние литологического строения и структурной переработки массива. Формирование золоторудных систем связано с миграцией гидротермальных флюидов в зонах тектонической активности, где деформационные процессы создают каналы повышенной проницаемости и условия для локализации минерализации (Авдонин, 2016; Черненко и Матайбаева, 2019).

Для орогенных и эпитеpmальных золоторудных объектов структурный контроль рассматривается как один из ведущих факторов рудолокализации (Cooke & Simmons, 2000; Groves et al., 1998). Развитие разломных зон, милонитизация и формирование участков повышенной трещиноватости оказывают определяющее влияние на пространственную организацию золотоносности. При этом литологический состав пород влияет на характер распределения деформаций и контраст проницаемости, что способствует формированию устойчивых пространственных доменов минерализации.

В пределах конкретного месторождения различия в физических свойствах пород (плотность, пористость) обуславливают неоднородность фильтрационно-ёмкостных характеристик массива, что отражается на распределении золота. Обобщённые подходы к типизации золоторудных объектов и их генетической интерпретации изложены в работах по геологии полезных ископаемых (Сох, 2005; Tian et al., 2026), где подчёркивается роль сочетания литологических и структурных факторов. Современный этап исследований характеризуется переходом от описательной интерпретации минерализации к количественному анализу пространственного контроля золотоносности. Для этого используется интеграция геологических данных в трёхмерные модели, позволяющие сопоставлять содержание золота с литологическими доменами и показателями структурной нарушенности (Tian et al., 2026). Такой подход обеспечивает более объективную оценку закономерностей распределения золота в пределах рудного поля.

Месторождение Ашиктас относится к жильному гидротермальному типу золоторудных объектов (Черненко и Матайбаева, 2019) и приурочено к вулканогенно-осадочной толще, осложнённой системой разломов различного ранга. Развитие тектонических нарушений создаёт предпосылки для формирования структурно контролируемой золотоносности. Настоящее исследование направлено на выявление устойчивых закономерностей пространственного распределения золота в пределах месторождения Ашиктас на основе литологической сегментации массива и анализа степени его структурной нарушенности. Основная задача заключается в выделении доменов золотоносности и оценке роли литологических и тектонических факторов в формировании пространственной структуры распределения Au.

Современные исследования золоторудных систем всё в большей степени ориентированы на интеграцию геологических, геохимических и геомеханических данных в рамках единого аналитического подхода. Это связано с тем, что традиционные методы интерпретации, основанные преимущественно на качественном анализе литологических и структурных особенностей, не всегда позволяют в полной мере учитывать сложный характер пространственной неоднородности минерализации. В условиях многофакторного контроля рудообразования возникает необходимость применения количественных методов, обеспечивающих сопоставимость различных параметров и возможность их интеграции в трёхмерные модели.

Особую актуальность приобретает использование показателей, отражающих состояние породного массива, в качестве дополнительных критериев интерпретации пространственного распределения полезных компонентов. В этом контексте показатель RQD, традиционно применяемый в инженерно-геологических и геомеханических исследованиях, представляет интерес как индикатор степени структурной нарушенности, потенциально связанной с проницаемостью среды и условиями миграции флюидов. Несмотря на широкое применение данного показателя в геотехнической практике, его использование в задачах рудной геологии остаётся ограниченным, что определяет научную новизну его применения для анализа пространственного контроля золотоносности.

В этой связи актуальной задачей является разработка подходов, позволяющих интегрировать литологические и геомеханические параметры в рамках единой модели

пространственного анализа. Такой подход обеспечивает переход от описательного уровня интерпретации к количественной оценке закономерностей распределения минерализации и позволяет выявлять устойчивые домены концентрации полезного компонента.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является золоторудное месторождение Ашиктас, расположенное в пределах вулканогенно-осадочной толщи, осложнённой системой тектонических нарушений различного ранга. Месторождение относится к жильному гидротермальному типу, приуроченному к зонам трещиноватости и кварцевизации в эффузивных и туфогенных породах (Авдонин, 2016; Черненко и Матайбаева, 2019).

Геологическое строение района сформировалось в результате многоэтапных тектонических процессов, обусловивших развитие разломов, зон брекчирования и участков интенсивной трещиноватости. Ключевым структурным элементом является Ашиктаский взброс, контролирующий пространственную организацию кварцевых тел и зон тектонической переработки массива.

В основу исследования положены:

1. Данные поисково-разведочного бурения;
2. Литологические описания керна;
3. Лабораторные определения плотности и пористости пород;
4. Результаты опробования на золото (Au).

Методические подходы к геологическому изучению и разведке месторождений соответствуют общепринятым принципам геологии и разведки полезных ископаемых. Лабораторные исследования выполнены с применением стандартных методов геохимического анализа (Аношин, 2016; Стримжа, 2015). Все исходные данные приведены к единой системе координат и интегрированы в цифровую трёхмерную среду для последующего пространственного анализа.

Литологическая модель построена на основе данных бурения с последующим объединением детальных разностей в укрупнённые литологические домены (рисунок 1). Критерием объединения послужили обобщённые физико-механические характеристики пород (плотность и пористость), отражающие различия их фильтрационно-ёмкостных свойств.

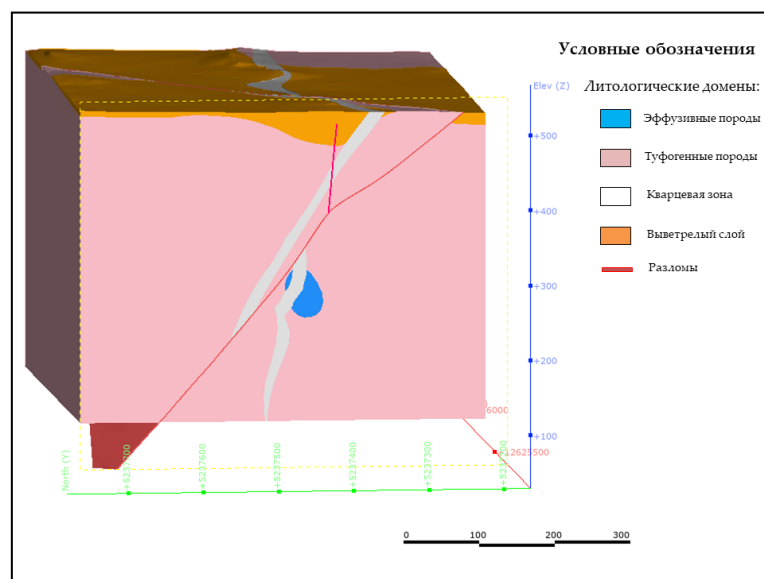


Рисунок 1. Литологическая модель

Примечание – составлено авторами

Обобщённые физико-механические характеристики литотипов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Обобщённые физико-механические характеристики основных литотипов месторождения Ашиктас (плотность и пористость по результатам лабораторных исследований; значения приведены для сравнительной характеристики литологических групп)

№	Литология	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Лит. группа	Интерпретационная роль
1	Андезиты	2,64	4,1	Эффузивные породы	Плотные вмещающие породы; флюидопроводящая роль реализуется преимущественно в зонах трещиноватости
2	Риолиты	2,59	4,8		
3	Дацииты	2,6	6,4		
4	Туфы андезитового состава	2,57	22,1	Туфогенные породы	Пористые породы- коллекторы, способствующие накоплению и локализации минерализации
5	Туфы риолитового состава	2,53	18,3		
6	Туфы дацитового состава	2,61	18,5		
7	Кварцевая зона	2,58	7,2	Кварц	Основные рудовмещающие структуры; минерализация контролируется трещинами и прожилками
8	Милониты	2,49	13,8	Милониты	Зоны интенсивной тектонической переработки; потенциальные каналы миграции флюидов за счёт развитой микротрещиноватости и деформационной анизотропии
Примечание – составлено авторами					

Следует отметить, что различия в плотности и пористости между выделенными литологическими группами отражают не только их физические свойства, но и особенности формирования и последующей геологической эволюции породного массива. Эффузивные породы, характеризующиеся сравнительно высокой плотностью и низкой пористостью, формировались в условиях быстрого охлаждения магмы, что обусловило их относительно монолитную структуру. В таких условиях развитие трещиноватости носит преимущественно вторичный характер и связано с тектоническими процессами.

В отличие от них, туфогенные породы обладают значительно более высокой пористостью, что связано с их пирокластическим происхождением и особенностями накопления вулканогенного материала. Наличие развитого порового пространства в сочетании с трещиноватостью создаёт благоприятные условия для аккумуляции флюидов и локализации минерализации. Это объясняет более широкое распространение интервалов повышенных содержаний золота в пределах данных доменов.

Кварцевые зоны и милониты представляют собой результат интенсивной структурной переработки породного массива. Их физико-механические характеристики отражают не первичные свойства пород, а вторичные изменения, обусловленные деформационными процессами. В связи с этим данные домены следует рассматривать как ключевые элементы, определяющие пути миграции и локализации рудоносных флюидов.

Как видно из таблицы 1, туфогенные породы характеризуются существенно более высокой пористостью по сравнению с эффузивами, тогда как милониты и кварцевые зоны отражают области структурной переработки массива. Эти различия послужили основанием для дальнейшей доменной сегментации и сопоставления концентраций металлов с выделенными литологическими группами.

Выделены следующие домены:

1. Эффузивные породы (андезиты, риолиты, дациты);
2. Туфогенные породы;
3. Кварцевые зоны;
4. Милонитизированные участки.

Выделение указанных доменов позволяет перейти от детального литологического описания к более обобщённой интерпретации пространственной структуры массива. Каждый из выделенных доменов характеризуется не только определённым набором физических свойств, но и специфической ролью в процессах рудообразования. Такое обобщение необходимо для снижения избыточной детализации геологических данных и выделения устойчивых закономерностей, имеющих практическое значение при анализе распределения полезного компонента. При этом важно отметить, что границы доменов носят условный характер и отражают прежде всего доминирующие свойства пород в пределах рассматриваемых интервалов. В реальных геологических условиях возможны переходные зоны, в которых свойства пород изменяются постепенно, что следует учитывать при интерпретации полученных результатов. Выделенные домены рассматривались как самостоятельные пространственные единицы анализа, характеризующиеся различными условиями миграции, накопления и локализации рудоносных флюидов. Такое обобщение позволило сопоставлять распределение золота не с отдельными литологическими разновидностями, а с укрупнёнными группами пород, обладающими сходными физическими свойствами и структурными особенностями.

На основе выделенных доменов в программном обеспечении Leapfrog Geo была построена трёхмерная литологическая модель месторождения. Моделирование выполнялось методом имплицитной интерполяции, при котором положение границ между различными типами пород определяется автоматически на основе данных буровых скважин. Использование имплицитного моделирования позволило формировать геологические поверхности непосредственно на основе данных бурения и обеспечить согласованность пространственной интерпретации различных литологических доменов в пределах единой трёхмерной модели.

Для последующего анализа в программном обеспечении Leapfrog Geo были построены блочные модели содержания золота (Au) и показателя RQD. Интерполяция выполнялась методом RBF Interpolant (Radial Basis Function). Выбор метода RBF Interpolant обусловлен необходимостью получения непрерывных и сопоставимых пространственных

моделей содержания золота и показателя RQD для их последующего анализа в пределах единой трёхмерной среды. Плавный характер распределения значений, формируемый данным методом, позволяет выявлять устойчивые пространственные закономерности и тенденции изменения исследуемых параметров. Параметры интерполяции подбирались таким образом, чтобы получаемые модели сохраняли основные особенности фактического распределения данных бурения и не создавали искусственных локальных аномалий, не подтверждённых результатами скважинных наблюдений.

Такой подход соответствует современным представлениям о пространственном моделировании золоторудных систем и позволяет переходить от детального литологического описания к анализу устойчивых пространственных доменов минерализации.

Для количественной характеристики степени фрагментации массива использован показатель Rock Quality Designation (RQD), предложенный D.U. Deere (Deere & Deere, 1989). Показатель определяется как процентное отношение суммарной длины фрагментов керна более 10 см к общей длине интервала бурения. На рисунке 2 представлена схема определения показателя RQD, иллюстрирующая принцип учёта длины фрагментов керна более 10 см при расчёте данного параметра.

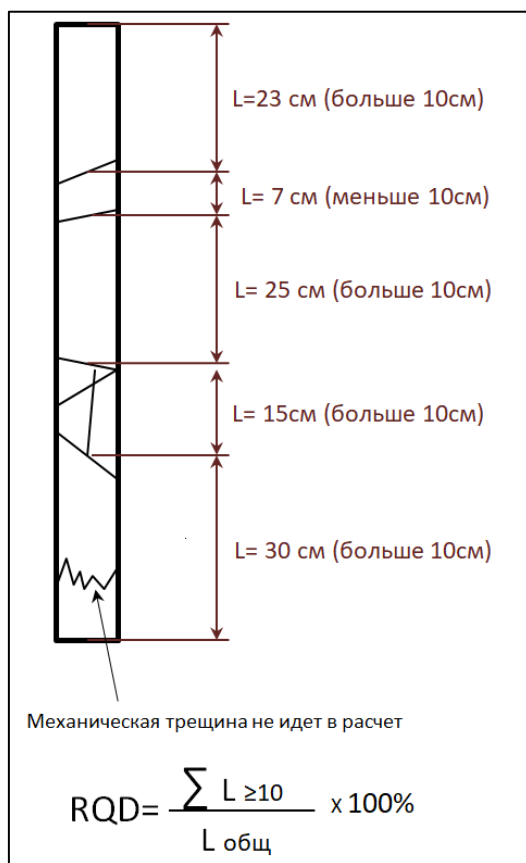


Рисунок 2. Схема определения показателя RQD по керну буровой скважины

Примечание – составлено авторами

Развитие и инженерно-геологическая интерпретация показателя представлены в работах (Bieniawski, 1989; Palmström, 2005; Reid & Stacey, 2009), где RQD рассматривается как индикатор целостности породного массива. В настоящем исследовании RQD используется не как прямой показатель проницаемости, а как относительный прокси-индикатор степени структурной нарушенности.

Интерпретация значений выполнена по следующим интервалам:

1. 0-25 % – интенсивно нарушенные породы;
2. 25-50 % – нарушенные породы;
3. 50-75 % – умеренно нарушенные породы;
4. 75-100 % – относительно монолитные породы.

Распределение интервалов по классам содержания золота и соответствующие значения показателя RQD приведены в таблице 2. Для каждого класса содержания Au определялось среднее значение RQD по интервалам, вошедшим в данный класс. Полученные значения использовались для последующего сопоставления классов содержания Au со степенью структурной нарушенности массива и результатами трёхмерного моделирования.

Таблица 2. Средние значения RQD по классам содержания золота

Класс содержания Au	Среднее значение RQD, %	Количество интервалов
до 0,5 г/т	58,48	более 1000
0,5-1 г/т	37,97	375
1-1,5 г/т	28,79	229
1,5-2 г/т	28,33	129
выше 2 г/т	19,65	346

Примечание – составлено авторами

На основе интегрированных геологических и аналитических данных построены трёхмерная литологическая модель, блочная модель распределения золота, модель распределения показателя RQD (рисунок 3).

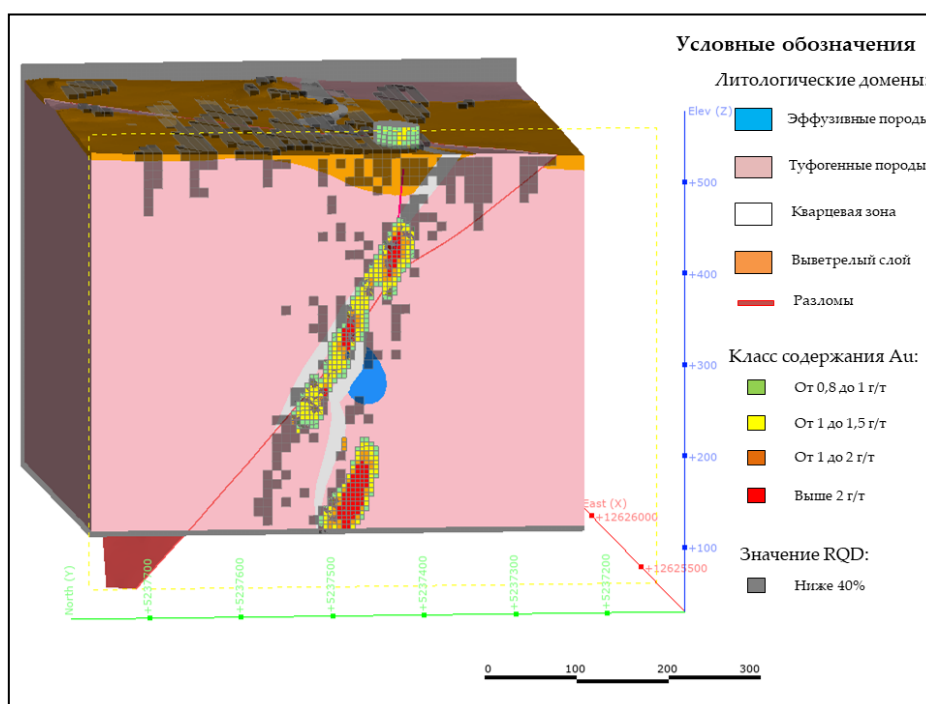


Рисунок 3. Литологическая модель, модель содержания золота (Au),
модель разломов и модель RQD в разрезе

Примечание – составлено авторами

В исследовании использованы данные более 120 поисково-разведочных скважин глубиной до 500 м, вскрывших основные литологические и рудоносные структуры месторождения. В качестве основной единицы анализа использовались интервалы бурения, для которых одновременно были доступны данные литологического описания, результаты опробования на золото и значения показателя RQD.

Количественная оценка пространственного контроля золотоносности выполнялась на основе сопоставления интервалов различных классов содержания Au с выделенными литологическими доменами и значениями показателя RQD. Для каждого класса содержания определялась доля интервалов, приходящаяся на соответствующие литологические домены, что позволило выявить общие тенденции распределения золота независимо от абсолютной распространённости отдельных типов пород в пределах месторождения.

Поскольку распределение содержаний золота в гидротермальных месторождениях характеризуется высокой неоднородностью и наличием отдельных высоких значений, основное внимание уделялось анализу устойчивых пространственных трендов и закономерностей изменения показателей между различными литологическими доменами и классами структурной нарушенности массива.

Применение трёхмерного моделирования соответствует современным подходам к оценке пространственного контроля золотоносности (Tian et al., 2026) и позволяет выполнять совместную пространственную визуализацию литологических доменов, распределения содержания Au и показателя RQD. При этом количественная оценка выполнялась не по блочным моделям, а непосредственно по данным буровых интервалов, использованным при построении моделей.

Для оценки пространственной приуроченности золота интервалы опробования были разделены на классы содержания. Для каждого класса определялись доля интервалов в пределах выделенных литологических доменов и соответствующие значения показателя RQD. Такой подход позволяет анализировать пространственные закономерности распределения золотоносности на основе исходных данных бурения и минимизировать влияние особенностей интерполяции, характерных для блочного моделирования.

Следует подчеркнуть, что применённый подход ориентирован на выявление обобщённых тенденций распределения золота и степени структурной нарушенности массива, а не на детальный анализ отдельных интервалов или локальных аномалий. Это позволяет повысить устойчивость интерпретации и сосредоточить внимание на закономерностях пространственного контроля золотоносности в пределах выделенных доменов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление распределения содержаний Au с выделенными литологическими доменами показало выраженную пространственную неоднородность золотоносности и наличие устойчивой доменной дифференциации минерализации. Повышенные содержания преимущественно приурочены к кварцевым зонам и милонитизированным участкам, тогда как в эффузивных и туфогенных породах высокие концентрации фиксируются существенно реже. Кварцевые зоны выступают в качестве основных рудовмещающих структур, что соответствует общим представлениям о локализации золота в жильных гидротермальных системах (Старостин и Игнатов, 2017; Черненко и Матайбаева, 2019). Пространственная связь золотоносности с участками тектонической переработки согласуется с концепцией структурного контроля минерализации, описанной для орогенных золоторудных систем (Groves et al., 1998). В пределах эффузивных и туфогенных доменов повышенные содержания Au, как правило, связаны с

локальными зонами трещиноватости и разломными структурами, что указывает на вторичный характер литологического контроля по сравнению со структурным фактором.

Совмещение литологической модели, блочной модели содержания золота и распределения RQD позволило выделить устойчивые типы пространственного контроля золотоносности:

1. Кварцевые зоны - домены концентрации Au, характеризующиеся пониженными значениями RQD и высокой степенью структурной переработки;
2. Милонитизированные участки - зоны повышенной фрагментации, выполняющие роль каналов миграции и перераспределения флюидов;
3. Эффузивные и туфогенные породы - преимущественно вмещающие домены, в которых золотоносность определяется наличием локальных зон трещиноватости.

Полученные закономерности подтверждают, что пространственная структура золотоносности формируется в результате совместного влияния литологического строения и тектонической переработки массива. При этом доминирующим фактором выступает структурный контроль в пределах кварцевых и милонитизированных зон, тогда как литологические различия создают контраст физико-механических свойств и влияют на перераспределение деформаций.

Анализ распределения средних значений RQD по классам содержания Au демонстрирует устойчивую тенденцию снижения RQD с ростом содержания золота. Наиболее высокие классы Au соответствуют зонам пониженной целостности массива (низкие значения RQD).

Такая зависимость указывает на связь золотоносности с участками повышенной фрагментации пород, что отражает роль трещиноватости и деформационных процессов в формировании каналов миграции гидротермальных флюидов (Reid & Stacey, 2009; Tian et al., 2026). Полученный результат согласуется с представлениями о том, что структурная переработка массива создаёт благоприятные условия для концентрации золота в пределах разломных зон и милонитов.

Использование RQD в качестве прокси-индикатора степени структурной нарушенности позволило количественно сопоставить золотоносность с уровнем фрагментации массива, что расширяет возможности интерпретации пространственного контроля Au на основе инженерно-геологических показателей.

Анализ показал устойчивую тенденцию снижения значений RQD при переходе от низких классов содержания Au к более высоким. Полученная закономерность свидетельствует о пространственной приуроченности повышенных содержаний золота к зонам повышенной трещиноватости и структурной нарушенности массива, что согласуется с представлениями о роли трещиноватости в формировании каналов миграции и осаждения рудоносных гидротермальных флюидов. Выявленная тенденция также находит визуальное отражение в построенных трёхмерных моделях, демонстрирующих пространственное совпадение областей повышенных содержаний Au с зонами пониженных значений показателя RQD.

Количественный анализ доли интервалов различных классов содержания Au в пределах выделенных доменов показал, что кварцевые зоны характеризуются наибольшей долей интервалов высоких классов содержания. Это подтверждает их роль как основных доменов концентрации золота, связанных с развитием трещиноватости и тектонической переработки массива.

В то же время значительная часть интервалов повышенных и средних классов содержания фиксируется и в пределах туфогенных пород. Их относительно высокая пористость создаёт условия для локальной аккумуляции минерализации, что позволяет рассматривать данные домены как потенциальные коллекторы золотоносных флюидов.

Таким образом, туфогенные породы не являются исключительно вмещающей средой, а способны участвовать в формировании зон накопления Au при наличии благоприятных структурных условий.

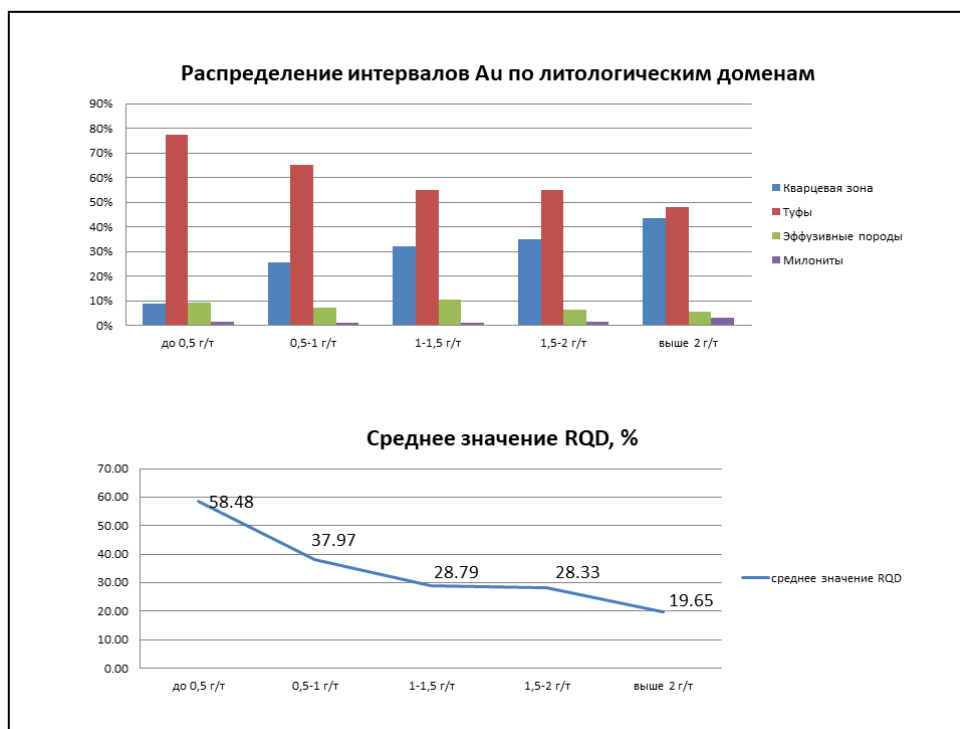


Рисунок 4. Количественная оценка распределения интервалов по классам содержания
Примечание – составлено авторами

Эффузивные породы демонстрируют более сложный характер поведения. При повышенной степени трещиноватости они выполняют роль флюидопроводящих структур, обеспечивающих миграцию золотоносных растворов. В условиях пониженной трещиноватости плотные эффузивы могут играть роль экранов, ограничивающих перераспределение флюидов и формирующих контраст проницаемости в пределах массива.

Таким образом, доменный анализ показывает, что пространственная структура золотоносности формируется не только за счёт локализации в кварцевых зонах, но и в результате функционального взаимодействия различных литологических доменов:

1. Кварцевые зоны – домены концентрации;
2. Туфогенные породы – домены аккумуляции (коллекторы);
3. Эффузивные породы – проводники или экраны в зависимости от степени трещиноватости.

Полученные результаты подтверждают, что интеграция литологической сегментации и анализа RQD позволяет выявлять не только зоны максимальной концентрации золота, но и функциональную роль различных типов пород в формировании пространственного контроля золотоносности в пределах жильных гидротермальных систем.

Анализ распределения долей интервалов по классам содержания золота показывает, что при интерпретации результатов важное значение имеет характер изменения показателей между последовательными классами содержания Au. В пределах кварцевых

зон и милонитизированных участков прослеживается устойчивая тенденция к увеличению доли интервалов по мере перехода от низких к высоким классам содержания Au. Такая направленная динамика свидетельствует о системной приуроченности высоких концентраций золота к данным доменам и подтверждает их роль как структурно контролируемых зон концентрации.

В эффузивных и туфогенных породах подобная закономерность выражена значительно слабее. Распределение долей интервалов по классам содержания в этих доменах носит более переменчивый характер: значения варьируют от класса к классу без чётко выраженной возрастающей или убывающей тенденции. Это указывает на отсутствие устойчивого монотонного накопления золота и отражает более сложное сочетание литологических и структурных факторов.

Таким образом, анализ тенденций распределения интервалов по классам содержания позволяет уточнить характер доменного контроля золотоносности: в кварцевых и милонитизированных зонах проявляется направленная концентрационная закономерность, тогда как в эффузивных и туфогенных породах распределение носит более дисперсный и локально обусловленный характер.

Дополнительным аспектом интерпретации полученных результатов является оценка применимости предложенного подхода за пределами рассматриваемого объекта. Несмотря на то, что исследование выполнено на примере месторождения Ашиктас, выявленные закономерности имеют более общий характер и могут быть использованы при анализе других гидротермальных золоторудных систем жильного типа. Применённый доменный подход, основанный на интеграции литологической сегментации и показателя структурной нарушенности (RQD), не привязан к конкретным геолого-структурным условиям исследуемого месторождения. Его универсальность определяется использованием обобщённых параметров, отражающих фундаментальные свойства породного массива – фильтрационно-ёмкостные характеристики и степень трещиноватости, которые являются ключевыми факторами миграции и локализации рудообразующих флюидов.

С практической точки зрения предложенный подход может быть использован на различных стадиях геологоразведочных работ. На этапе поисков и оценки он позволяет уточнять приоритетные зоны бурения за счёт выделения доменов с повышенной вероятностью концентрации золота. На стадии детальной разведки и моделирования месторождения методика способствует снижению неопределённости при интерпретации результатов опробования и повышению достоверности геологических моделей. Интеграция литологических и геомеханических параметров в рамках единой модели также создаёт предпосылки для более тесной увязки геологического и геотехнического анализа, что особенно важно при переходе к стадии освоения месторождения.

Следует отметить, что использование показателя RQD в качестве прокси-индикатора степени структурной нарушенности имеет ряд ограничений. Данный показатель отражает интегральную характеристику состояния массива, но не учитывает пространственную ориентацию трещин, их связность и гидравлическую проводимость. В связи с этим интерпретация результатов должна выполняться с учётом геологического контекста и, при наличии соответствующих данных, дополняться структурным анализом. Кроме того, точность доменной сегментации зависит от качества исходной информации, включая детальность литологических описаний и плотность буровой сети, что может оказывать влияние на устойчивость выявленных закономерностей.

Несмотря на указанные ограничения, интеграция литологических и геомеханических параметров в рамках доменного анализа представляет собой эффективный инструмент количественной оценки пространственного контроля

минерализации. В отличие от традиционных подходов, основанных преимущественно на качественной интерпретации геологических данных, предложенная методика позволяет формализовать взаимосвязь между содержанием полезного компонента и характеристиками породного массива. Полученные закономерности согласуются с современными представлениями о структурном контроле золоторудной минерализации, согласно которым зоны повышенной трещиноватости и тектонической переработки массива играют определяющую роль в миграции и локализации рудоносных гидротермальных флюидов (Groves et al., 1998; Tian et al., 2026).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый доменный анализ позволил установить устойчивые закономерности пространственного распределения золота в пределах месторождения Ашиктас на основе интеграции литологической сегментации массива и оценки степени его структурной нарушенности. Полученные результаты показывают, что пространственная структура золотоносности формируется в результате взаимодействия литологических свойств пород и тектонической переработки массива.

Кварцевые зоны выступают в качестве основных доменов концентрации золота и характеризуются пониженными значениями показателя RQD, что отражает их приуроченность к зонам интенсивной трещиноватости и деформации. Вместе с тем туфогенные породы, обладающие повышенной пористостью, способны выполнять роль коллекторов, обеспечивая локальную аккумуляцию золотоносной минерализации при наличии благоприятных структурных условий. Эффузивные породы демонстрируют функциональную двойственность: при развитой трещиноватости они обеспечивают проводимость золотоносных флюидов, тогда как при низкой степени нарушенности могут играть роль экранов, формируя контраст проницаемости и ограничивая перераспределение минерализации.

Установленная тенденция снижения средних значений RQD с увеличением класса содержания золота подтверждает значимую роль структурной переработки массива в формировании зон повышенной золотоносности. Таким образом, доменный подход позволяет не только выделять участки максимальной концентрации Au, но и интерпретировать функциональную роль различных литологических доменов в пределах единой гидротермальной системы. Интеграция литологического моделирования и анализа показателя RQD обеспечивает переход от качественного описания минерализации к количественной оценке пространственного контроля золотоносности и может быть использована при уточнении прогноза перспективных участков, оптимизации дальнейшего бурения и снижении неопределённости при интерпретации результатов опробования.

Полученные результаты имеют не только локальное значение для рассматриваемого месторождения, но и демонстрируют возможность более широкого применения предложенного подхода в практике геологоразведочных работ. Использование доменного анализа в сочетании с показателями структурной нарушенности позволяет формировать более обоснованные представления о пространственной организации рудных систем и может быть адаптировано для различных типов гидротермальных месторождений.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенной методики при планировании буровых работ, оптимизации сетей опробования и уточнении геологических моделей месторождений. Интеграция литологических и геомеханических параметров позволяет повысить достоверность прогнозирования перспективных участков и снизить уровень неопределённости при интерпретации рудоносных зон и планировании дальнейшего бурения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования и грантов. Анализ основан на материалах геологоразведочных работ и камеральных данных, полученных в рамках производственных работ по изучению месторождения. Дополнительное финансирование на проведение исследований, направленных на анализ пространственного контроля золотоносности в зависимости от литологических доменов и степени структурной нарушенности, не привлекалось.

ЗАЯВЛЕНИЕ ОБ ОДОБРЕНИИ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫМ ЭТИЧЕСКИМ КОМИТЕТОМ (IRB): Не применимо.

ЗАЯВЛЕНИЕ ОБ ИНФОРМИРОВАННОМ СОГЛАСИИ: Не применимо.

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ: Данные, подтверждающие результаты данного технического исследования, могут быть предоставлены соответствующим автором по обоснованному запросу.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке статьи использовалась генеративная модель ИИ: ChatGPT (GPT-5 mini) на этапе редактирования текста. Использование ИИ ограничивалось исключительно помощью в подборе формулировок и стилистической выверке, при этом все аналитические выводы и интерпретации данных подготовлены авторами самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bieniawski, Z. (1989). Engineering Rock Mass Classifications. Wiley, 22-28. <https://www.wiley.com/en-us/Engineering+Rock+Mass+Classifications%3A+A+Complete+Manual+for+Engineers+and+Geologists+in+Mining%2C+Civil%2C+and+Petroleum+Engineering-p-9780471601722>
- Cooke, D., & Simmons, S. (2000). Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. Reviews in Economic Geology, Vol.13, 221-244. <https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/books/edited-volume/1223/chapter-abstract/107025824/Characteristics-and-Genesis-of-Epithermal-Gold?redirectedFrom=fulltext>
- Cox, S. (2005). Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust. Economic Geology, Vol.100, 39-75. <https://doi.org/10.5382/AV100.04>
- Palmström, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). Tunnelling and Underground Space Technology, 20, 362-377. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.01.005>
- Deere, D.U., & Deere, D.W. (1989). Rock Quality Designation (RQD) after twenty years. U.S. Army Corps of Engineers. <https://www.semanticscholar.org/paper/ROCK-QUALITY-DESIGNATION-%28RQD%29-AFTER-TWENTY-YEARS.-Deere-Deere/7d47816b2583ee382068e667cc7385cd366c2e94>
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Robert, F. (1998). Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore Geology Reviews, Vol.13, 7-27. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00012-7)
- Kelley, K.D., Spry, P.G., McLemore, V.T., Fey, D.L., Anderson, E.D. (2020). Alkaline-type epithermal gold deposit model. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report. <https://doi.org/10.3133/sir20105070R>

- Reid, D., Stacey, P. (2009). Guidelines for Open Pit Slope Design. CSIRO Publishing. <https://doi.org/10.1071/9780643101104>
- Tian, Z., Ding, Z., MacKenzie, D. (2026). Structural control of gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, Eastern China. Journal of Structural Geology. Vol. 206, № 105654, 1481-1496. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2026.105654>
- Авдонин, В. В. (2016). Геология и разведка месторождений полезных ископаемых. Академический проект, 45–47. <https://www.geokniga.org/books/24718> // Avdonin, V. V. (2016). Geologiya i razvedka mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [Geology and exploration of mineral deposits]. Akademicheskii Proekt, 45–47. <https://www.geokniga.org/books/24718>
- Аношин, Г. Н. (2016). Химический анализ в геологии и геохимии. Академкнига, 7–33. <https://www.geokniga.org/authors/34529> // Anoshin, G. N. (2016). Khimicheskii analiz v geologii i geokhimii [Chemical analysis in geology and geochemistry]. Akademkniga, 7–33. <https://www.geokniga.org/authors/34529>
- Старостин, В. И., & Игнатов, П. А. (2017). Геология полезных ископаемых. Академический проект, 129–140. <https://www.geokniga.org/books/11604> // Starostin, V. I., & Ignatov, P. A. (2017). Geologiya poleznykh iskopaemykh [Geology of mineral deposits]. Akademicheskii Proekt, 129–140. <https://www.geokniga.org/books/11604>
- Стримжа, Т. П. (2015). Прикладная геохимия. Недра, 37–46. <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=BOOK1-550/%D0%A1%20855-269171111> // Strimzha, T. P. (2015). Prikladnaya geokhimiya [Applied geochemistry]. Nedra, 37–46. <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=BOOK1-550/%D0%A1%20855-269171111>
- Черненко, З. И., & Матайбаева, И. Е. (2019). Промышленные типы месторождений полезных ископаемых. Бастау, 151–169. <https://lem.kz/publishing-house/promyshlennyye-tipy-mestorozhdeniy-poleznykh-iskopayemykh/1861> // Chernenko, Z. I., & Mataibaeva, I. E. (2019). Promyshlennyye tipy mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [Industrial types of mineral deposits]. Bastau, 151–169. <https://lem.kz/publishing-house/promyshlennyye-tipy-mestorozhdeniy-poleznykh-iskopayemykh/1861>
- ChatGPT (GPT-5 mini). (2026, March 11). Assistance with wording selection and stylistic editing of the text [Large language model]. OpenAI. <https://chat.openai.com>

Авторлар туралы мәліметтер

Информация об авторах

Information about authors



Бармаков Дияр Кайратович – геология саласы бойынша техникалық ғылымдар магистрі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (ШҚТУ) Жер ғылымдары мектебінің PhD докторанты, Өскемен, Қазақстан Республикасы

Бармаков Дияр Кайратович – магистр технических наук по геологии, докторант PhD Школы наук о Земле в ВКТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Barmakov Diyar – Master of Technical Sciences in Geology, PhD candidate, School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (EKTU), Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan,

e-mail: diyar.barmakov@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8786-3819>,



Черненко Зинаида Ивановна – геологиялық-минералогиялық ғылымдар кандидаты, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ Жер ғылымдары мектебінің аға оқытушысы, Өскемен, Қазақстан

Черненко Зинаида Ивановна – кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель Школы наук о Земле в ВКТУ им. Д. Серикбаева

Chernenko Zinaida – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Lecturer, School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan,

e-mail: zinchernenko@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3137-8300>,



Язиков Егор Григорьевич – геологиялық-минералогиялық ғылымдар докторы, геология кафедрасының профессоры, Томск Политехникалық университеті Геология және мұнай-газ ісі институтының директоры, Томск қ., Ресей Федерациясы

Язиков Егор Григорьевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии, директор Института геологии и нефтегазового дела Томского Политехнического университета, г. Томск, Россия

Yazikov Egor – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Department of Geology, Director, Institute of Geology and Petroleum Engineering, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation,

e-mail: yazikoveg@tpu.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7925-6249>