

ВОЗМОЖНОСТЬ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, СКРЫТЫХ ПОД ЛЕДНИКАМИ В АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

В. Н. Макаров

Институт мерзлотоведения Сибирского отделения РАН (Якутск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2025 г.

Для цитирования

Макаров В. Н. Возможность геохимических поисков месторождений полезных ископаемых, скрытых под ледниками в арктических районах // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 3. — С. 398—408. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-398-408.

На основании результатов геохимических исследований, проведенных в районе высокогорного золоторудного месторождения Кумтор (Срединный Тянь-Шань), делается вывод о возможности поисков рудных месторождений, скрытых ледниками в арктических районах. Работами были охвачены ледники холодного и теплого типа: Петрова, Сары-Тор, Давыдова, Лысый, № 354 и Боорду, перекрывающие золото-вольфрам-сульфидные рудные тела месторождения. Установлено, что во льдах на поверхности ледников в эпицентрах рудных тел и эндогенных ореолов формируются криогенные геохимические поля (КГП). Строение КГП на ледниках месторождения Кумтор характеризуется качественными (химические элементы и соединения) и количественными (концентрация элементов, протяженность ореолов) показателями, закономерно распределяющимися во льдах на поверхности ледников. Химический состав КГП ледников отражает состав рудных тел и эндогенных ореолов месторождения Кумтор. Охарактеризованы особенности КГП, формирующихся на поверхности ледников в эпицентрах рудных тел при установленной мощности льда до 175 м. Протяженность геохимических аномалий КГП на поверхности ледников от эпицентра рудного тела по направлению движения льда колеблется от 50–100 до 600 м. Даны рекомендации по использованию КГП при прогнозно-поисковых работах в ледниковых районах Арктики.

Ключевые слова: арктические регионы, ледники, геохимические аномалии, вещественный и минеральный состав, рудные месторождения, золото, вольфрам.

Введение

Крупные и легко открываемые месторождения полезных ископаемых в России почти исчерпаны. Геологи вынуждены продвигаться все дальше в Арктическую зону и труднодоступные регионы Дальнего Востока и Сибири. Острая необходимость наращивания запасов полезных ископаемых в районах деятельности горнодобывающих предприятий и необходимость геологического изучения новых перспективных территорий страны выдвинула проблему поисков в сложных геологических условиях,

в том числе и в арктических районах. Обширная территория Арктической зоны России перспективна на открытие новых крупных месторождений стратегических металлов [1]. Однако геолого-геофизические исследования, а также состояние инфраструктуры в регионе в целом недостаточны для полного вовлечения их минерально-ресурсной базы в экономическую деятельность страны [2]. По мнению геолога, исследователя Арктики академика РАН Валерия Верниковского, в труднодоступных районах российской Арктики еще остаются районы с белыми пятнами — полностью неизведанными территориями. К таким территориям относятся и ледниковые районы:



покрытые ледниками острова российской Арктики и суб арктические горные районы Севера, Северо-Востока Сибири, Коряцкого нагорья и Камчатки.

База данных «Ледники России», созданная в Институте географии РАН [3], оценивает общую площадь закрытых ледниками арктических и субарктических районов в России в 53 тыс. км², что составляет около 0,3% территории страны (рис. 1).

Согласно базе данных «Ледники России», на территории страны в настоящее время находятся 7478 ледников, сгруппированных в 22 ледниковые системы. Самые крупные по площади ледниковые системы расположены в Арктике на архипелагах Новая Земля (более 22 тыс. км²), Северная Земля (16,5 тыс. км²) и Земля Франца-Иосифа (12,5 тыс. км²). В диапазон площадей от 500 до 1000 км² попадает ледниковый район — Камчатка (683 км²). Площади ледников на арктическом острове Ушакова, в горах Сунтар-Хаята и Корякском нагорье примерно одного порядка — от 100 до 300 км². Самая многочисленная группа — это небольшие ледниковые системы, площадь которых колеблется от 10 до 100 км². Они расположены в разных гляциологических зонах — полярной (острова Де-Лонга) и субполярной (Урал, Плато Путорана, Горы Быранга, Хребет Черского, Чукотское нагорье и северо-восток Корякского нагорья). Самые маленькие по площади (менее 10 км²) ледниковые системы — хребет Орулган и Колымское нагорье.

На закрытых ледниками арктических и суб арктических территориях могут находиться и могут быть выявлены новые крупные объекты. В послед-

Рис. 1. Площадь современных ледников на территории России, 2016–2019 гг. Источник: [3]

Fig. 1. Area of current glaciers in Russia, 2016–2019. Source: [3]

ние годы высокий уровень мировых цен на благородные металлы — одна из основных причин развития геолого-разведочных работ в отдаленных районах Арктики. Исторически главной целью для геологических исследований в этих районах остается золото [4]. Примером такого объекта, частично расположенного под мощной толщей ледниковых льдов, является золоторудное месторождение Кумтор. Оно расположено в восточной части Срединного Тянь-Шаня на северо-западном макросклоне ледникового массива Ак-Шыйрак на высоте свыше 4000 м над уровнем моря, в зоне вечной мерзлоты.

Горный массив Ак-Шыйрак представляет собой слабо расчлененное горное поднятие со средней абсолютной высотой в центральных частях порядка 4600 м. Рельеф гляциальный: крупные ледниковые кары и цирки с современными ледниками чередуются с крутыми гребнями и плоскими водораздельными поверхностями.

Мощность льда ледников массива Ак-Шыйрак в районе месторождения Кумтор — в среднем 60—100 м, максимальная — до 175 м (табл. 1).

Климатические условия связаны с внутригодовым положением района и характеризуются значительной континентальностью и суровостью климата с отрицательной среднегодовой температурой $-7,8^{\circ}\text{C}$, что сопоставимо с суровыми климатическими условиями Арктики (Новая Земля) [6]. Наиболее холодным месяцем является январь, а самым теплым — июль. Абсолютный температурный минимум составляет -45°C . Среднегодовое годовое количество атмосферных осадков на гидрометеоро-

Таблица 1. Мощность льда ледников массива Ак-Шыйрак в районе месторождения Кумтор, м [5]

Table 1. Ice thickness of the glaciers of the Ak-Shyirak massif in the area of the Kumtor deposit, m [5]

Ледник	Средняя	Максимальная
Петрова	70	173
Лысый	60	—
Давыдова:	92	175
Восточный	90	175
Центральный	100	160
Западный	85	170
Сары-Тор	—	165
Боорду	100	—

рологической станции (ГМС) «Тянь-Шань» в базовый период наблюдений 1961—1990 гг. составляло 371 мм, из них за холодный период (ноябрь-март) выпадало всего 49 мм, или 13,2%. Основная масса осадков выпадает в теплый период, причем большая их часть в виде снега и только 8% годового количества приходится на жидкие осадки, которые наблюдаются всего 11 дней в году.

Наблюдается сплошное распространение многолетнемерзлых пород мощностью 90—370 м, температура $-1,7...-4,9^{\circ}\text{C}$. Таликовые зоны находятся только под крупными долинными ледниками [7].

Главная водная артерия — река Кумтор с ее левыми притоками Сарытор и Боорду. Зимой (декабрь-февраль) реки промерзают до дна.

Золоторудное месторождение Кумтор по своим запасам является уникальным месторождением «мирового класса». Оно входит в пятерку крупнейших в мире рудников по запасам золота — подтвержденные и прогнозируемые запасы составляют порядка 700 т. С начала промышленного производства в мае 1997 г. по 30 июня 2022 г. на Кумторе произведено более 430 т золота [10].

Объекты рудника Кумтор расположены на высотах 3600—4400 м над уровнем моря в нивально-гляциальном поясе Тянь-Шаня. Золоторудное месторождение Кумтор одно из самых высокогорных в мире наряду с таким, например, как золотосеребряный рудник Паскуа-Лама, расположенный на высотах 4800—5200 м.

Геологические изыскания велись в этой местности начиная с 1920-х годов. Но само месторождение было открыто геологами Б. А. Резниковым и В. В. Бурцевым, сотрудниками геофизической экспедиции «Киргизгеология» в 1978 г. Геологическое строение района месторождения определяется его принадлежностью к миогеосинклинальной зоне

каледоно-герцинской складчатости Тянь-Шаня. На древнем гранитогнейсовом основании несогласно залегают мощные толщи метавулканогенных, осадочных пород рифея-венда. Породы представлены высокоуглеродистыми и кремнистыми сланцами, филлитами. По разрывным нарушениям размещаются тела гранитоидов и метасоматитов.

Золото-(вольфрам)-сульфидное месторождение Кумтор контролируется Главной минерализованной зоной, по простираению которой располагаются метасоматиты и оруденение. Рудные тела локализованы в Кумторской зоне смятия длиной более 7 км и мощностью 300—400 м. Месторождение частично скрыто под мощными толщами льдов ледников Давыдова, Сары-Тор, Лысый, Петрова, № 354, Боорду. В настоящее время разрабатываемое рудное золотоносное тело залегает около ледников Лысый, Давыдова и Сары-Тор и под ними. Перспективны фланговые участки — ледники Петрова, Боорду и др. [8].

Рудные тела представлены линейными минерализованными зонами с вкрапленно-прожилковым и штокверковым оруденением, имеющим четкий структурный и литолого-стратиграфический контроль, который проявляется в приуроченности рудных тел к зоне повышенных тектонических деформаций в углеродистой колчеданосной филлитовой рудоносной формации. Главным рудным минералом, с которым связано основное количество золота, является пирит. Количество сульфидов в рудах колеблется от 5% до 20—30% (в среднем 15—20%). Рудное поле сопровождается комплексными эндогенными геохимическими ореолами: Au, Ag, Mo, W, Pb, Zn, Cu, Co, Ni, Ba, Ti, Mn, V, Be, K, Na. Рудные тела — продуктивные золото-вольфрам-сульфидные «залежи», пирит-полевошпат-карбонатные метасоматиты — сопровождаются контрастными эндогенными ореолами Au, Ag, Mo, W, K, Na.

Возможности геохимических поисков рудных тел, перекрытых ледниками, изучались на золоторудном месторождении Кумтор в 1988—1989 гг. Геохимические поля изучались на ледниках, расположенных в восточной части внутреннего Тянь-Шаня (Киргизия). Геолого-разведочные работы на месторождении в это время находились на стадии разведки и были сосредоточены в северо-западной части рудного поля в районе ледника Давыдова. Положение рудных тел на флангах рудного поля под перекрывающими их ледниками было неизвестно.

Методы исследований

Геохимические исследования были проведены в 1988—1989 гг. на северо-западном макросклоне хребта Ак-Шыйрак в районе Кумторского золоторудного месторождения. На месторождении в этот период проводились поисково-разведочные работы. В центральной части месторождения в районе ледника Давыдова велись канавные горные работы, а со льда ледника была пробурена скважина.

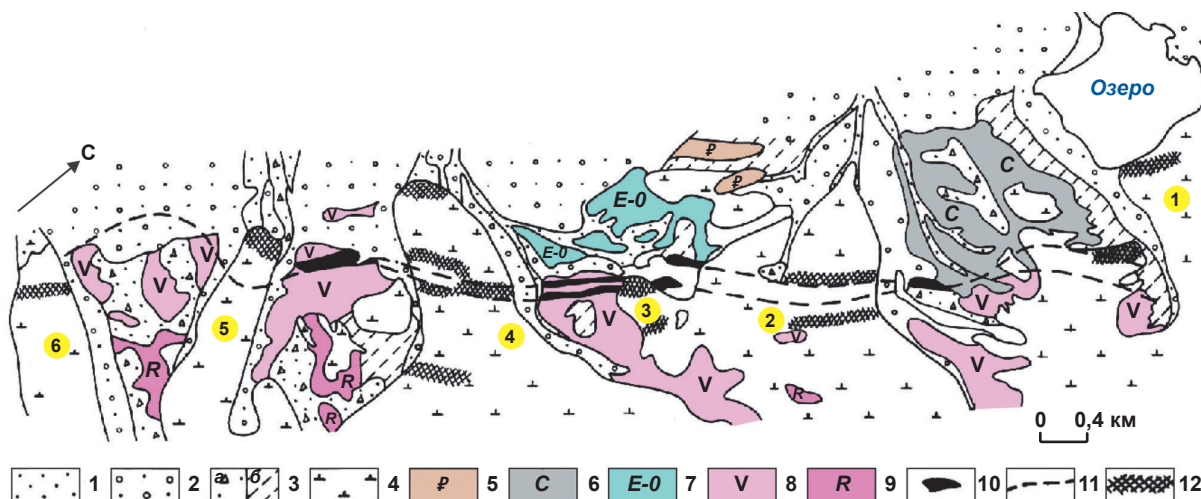


Рис. 2. Аномалии криогенных геохимических полей на поверхности ледников Кумторского рудного поля. Кайнозойские отложения: 1 – аллювиальные, галечники, пески; 2 – элювиально-делювиальные, щебень, дресва, пески; 3 – ледниковые (а) и делювиально-пролювиальные (б), валуны, галька, щебень, пески, суплинки; 4 – ледниковые льды (ледники: 1 – Петрова, 2 – Лысый, 3 – Давыдова, 4 – Сары-Тор, 5 – Боорду, 6 – № 354). Геологические образования: 5 – палеогеновые и 6 – нижнекарбоневые песчаники, алевроиты; 7 – кембрийско-ордовикские известняки; 8 – венд сланцы, филлиты; 9 – рифей вулканогенно-осадочные отложения; 10 – рудные тела; 11 – разрывные нарушения; 12 – криогенные геохимические поля

Fig. 2. Anomalies of cryogenic geochemical fields on the surface of glaciers of the Kumtor ore field. Cenozoic deposits: 1 – alluvial, pebbles, sands; 2 – eluvial-deluvial, rubble, gruss, sands; 3 – glacial (a) and deluvial-proluvial (b), boulders, pebbles, rubble, sands, loams; 4 – glacial ice (glaciers: 1 – Petrov, 2 – Lysy, 3 – Davydov, 4 – Sary-Tor, 5 – Bordu, 6 – No. 354). Geological formations: 5 – Paleogene and 6 – Lower Carboniferous sandstones, siltstones; 7 – Cambrian-Ordovician limestones; 8 – Vendian shales, phyllites; 9 – Riphean volcanogenic-sedimentary deposits; 10 – ore bodies; 11 – faults; 12 – cryogenic geochemical fields

Геохимические исследования были сосредоточены на ледниках холодного и теплого типа: Петрова, Сары-Тор, Давыдова, Лысый, № 354 и Боорду, перекрывающих Главную минерализованную зону и рудные тела.

На каждом леднике были пройдены поисковые маршруты вдоль ледника с его вершины до языка с отбором проб льда с поверхности ледника. Лед отбирался с поверхности ледника сразу под фирном. Расстояние между пробами составляло 50–100 м. На ледниках отобраны 93 пробы льда. Вес пробы (1,0–1,5 кг) ограничивался необходимым объемом растопленного льда для комплексного анализа воды — 1 л. Таяние льда и упаковка воды в химически чистые емкости проводились при комнатной температуре в поселке Кумтор на полевой базе высокогорной лаборатории Института мерзлотоведения Сибирского отделения РАН (ИМЗ СО РАН).

Аналитическая обработка геохимических проб проводилась в Якутске. Полный химический анализ воды (льда) был выполнен в лаборатории геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аналитики Л. Ю. Бойцова, О. В. Шепелева), приближенно-количественный атомно-эмиссионный спектральный анализ микроэлементного состава воды на 35 элементов и атомно-абсорбционное определение золота (Perkin-Elmer, с графитовой кюветой) — в Центральной геологической лаборатории ПГО «Якутскгеология».

Математическая обработка аналитических гидро- и литохимических данных проводилась в отделе информатики Якутского территориального геологического управления с использованием стандартных

статистических прикладных программ «Геоаналитика» и др. Фоновые и аномальные значения рассчитывались отдельно по каждому леднику.

Результаты и обсуждение

Геохимическими исследованиями было установлено, что на поверхности льда ледников, перекрывающих минерализованную зону и рудные тела, имеются комплексные аномалии элементов — индикаторов золоторудной минерализации. Образование геохимических аномалий на поверхности ледников обусловлено формированием криогенных геохимических полей (КГП) элементов-индикаторов в толще ледников, перекрывающих рудные тела. Состав наложенных ореолов соответствует составу рудных тел и эндогенных ореолов. На поверхности всех ледников, перекрывающих рудные тела и минерализованную зону, установлены четкие геохимические аномалии элементов, определяющих геохимические особенности системы — типоморфных для рудного тела и эндогенного ореола: Au, W, Pb, Cr, Cu, Sn (рис. 2).

Ореолы золота и типоморфных элементов располагаются на поверхности ледников в эпицентре непосредственно над проекцией рудной зоны, протяженность аномалий по направлению движения ледника обычно 150–200 м, иногда достигает его языка.

Юго-западный фланг Центрального участка месторождения перекрывается ледником Давыдова. Ширина ледника в нижней части 0,8–0,9 км, толщина льда достигает 160–175 м при средней мощности 85–100 м. По данным термометрии темпе-

ратура льда составляет -6°C на глубине 5 м и на глубине более 30 м приближается к точке плавления. Интервал глубин 40—109 м заполнен наплавленной водой, и температура льда в указанном интервале не ниже $-0,5^{\circ}\text{C}$.

Язык ледника в средней и верхней части имеет трещины и разделен вдоль на две ветви срединной мореной. Ветви ледника имеют разную активность. Поверхностная скорость движения правой ветви ледника в летнее время составляет 1—2 см/сут, левая более активна — 1—4 см/сут. Угол наклона языка 5—6°. Ниже ледника между языком и конечным валом моренных гряд высотой 80—90 м находится обширное зандровое поле.

На языке ледника толщина слоя аккумуляции снега варьирует от 20 см у нижнего края до 150 см на высоте границы питания при плотности $0,36 \text{ г/см}^3$.

В поперечном сечении ледник имеет асимметричное строение, и наибольшие мощности льда приурочены к его левому борту.

Придонная часть ледника сложена льдом со сравнительно большим содержанием моренного обломочного материала общей мощностью от нескольких метров до 11 м. Верхняя толща ледника сложена относительно чистым льдом.

Геохимическое опробование на леднике Давыдова проведено двумя профилями вдоль обеих ветвей языка. Шаг опробования в основном составлял 100 м. На участках предполагаемого перекрытия рудной зоны ледником на поверхности ледника фиксируются четкие геохимические аномалии элементов, типоморфных для рудного тела и эндогенного ореола: Au, W, Pb, Cr, Cu, Sn. Контрастность аномалий по отношению к фоновому содержанию в ледниках ледникового массива Ак-Шыйрак уменьшается в ряду: Au (20) — Pb (5) — Cr, Cu, Mo (3) — W, Sn (2).

Ореолы типоморфных элементов располагаются на поверхности ледника в эпицентре рудной зоны, перекрытой мощной толщей льда. Протяженность аномалий по направлению движения ледника достигает 150—200 м. Предполагаемые на правой ветви языка две сближенные рудные зоны, северная и южная, вскрытые дальнейшими горными работами (см. рис. 2), с суммарной мощностью около 0,3 км формируют общую аномальную область протяженностью около 600 м по золоту и до 900 м по сульфатам.

Аномалии элементов — индикаторов золоторудной минерализации на поверхности ледника Давыдова формируются как над рудным телом, так и эндогенными ореолами, отражая состав рудной минерализации.

Непосредственно в эпицентре рудной зоны наблюдается возрастание pH и Eh (с градиентом Eh 70—84 мВ). Элементы — индикаторы эндогенных ореолов (Cu, Mo и Cr) образуют бимодальные ореолы с модами по сторонам проекции рудной зоны [7].

В пределах ореола, сформированного над рудной зоной, отмечается повышенное содержание ионов натрия и сульфатов. Причем если несколько более

контрастные ореолы сульфатов и натрия фиксируются над правой ветвью ледника Давыдова, то над левой его частью отмечаются повышенные содержания большинства тяжелых металлов. Протяженность ореолов также увеличивается над левой ветвью ледника. Например, для ореолов золота она возрастает почти вдвое — с 0,7 до 1,4 км. При этом мощность льда заметно больше именно над левой ветвью ледника Давыдова. Большая протяженность аномалий и их комплексность свидетельствуют об усложнении структуры рудной зоны под ледником и существовании субширотного тектонического нарушения в центральной части ледника. Действительно, характер рудной зоны к юго-западу от ледника Давыдова существенно меняется, что зафиксировано при вскрытии ледника в ходе дальнейшего геологического изучения месторождения [3; 5; 10].

Ледник Лысый находится в 2 км к северо-востоку от Центрального участка месторождения. В районе ледника и под ним в настоящее время разрабатывается золотоносное рудное тело. Ледник Лысый висячего типа, располагается на высотах 4050—4200 м. Толщина льда на участке исследований — 60 м. По данным термометрии горных выработок, пройденных в толще ледника, температура льда изменяется от -6°C на поверхности до $-2,5^{\circ}\text{C}$ в придонной части.

Ледник на протяжении почти 300 м перекрывает золоторудное тело (рис. 3). Подошва ледника в пределах наиболее углубленной части ложа находится на горизонте 4050 м. Установлено, что содержание типоморфных элементов в ледниковом льду в зоне контакта с горными породами на расстоянии 0,1—0,3 м от руды в десятки раз выше фонового содержания в ледниках массива. Проникновение химических элементов в лед обусловлено криогенной миграцией и формированием ореола рассеяния. Максимальная контрастность геохимического ореола наблюдается непосредственно на контакте льда с рудными метасоматитами и уменьшается по мере удаления от руды к поверхности ледника. На поверхности ледника над рудным телом фиксируются слабые аномалии типоморфных элементов золота, вольфрама, меди и цинка. На поверхности ледника над рудным телом фиксируются слабые аномалии типоморфных элементов золота, вольфрама, меди и цинка. Контрастность аномалий (KK) по отношению к фоновым значениям максимальна для Cu, Zn и W (≥ 20) и уменьшается в ряду (в скобках приведена величина KK): Cu (80) — Zn (30) — W (20) — Au, Cr (10) — Ag, Sn (7) — V (5) — Mo, Pb (3).

Аномалии элементов — индикаторов золоторудной минерализации в леднике формируются как над рудным телом, так и эндогенными ореолами, отражая состав рудной минерализации.

Распределение химических элементов на поверхности ледника неоднородно. Непосредственно в эпицентре рудного тела на поверхности ледника практически без смещения наблюдаются аномалии золота, цинка, меди, вольфрама и хрома. Отрицательные аномалии над месторождением формируют

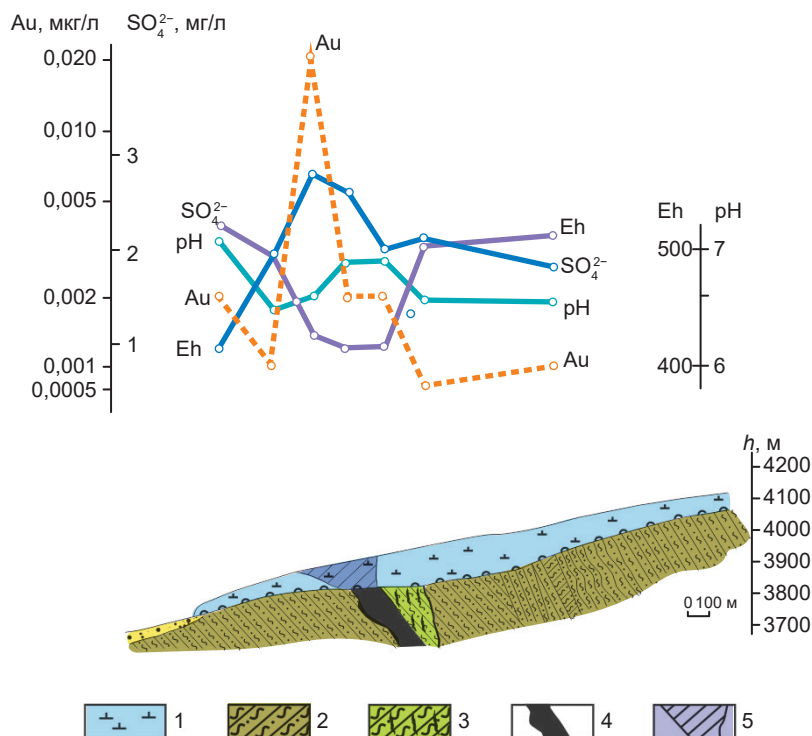


Рис. 3. Аномалии криогенного геохимического поля на поверхности ледника Давыдова в эпицентре рудного тела: 1 — ледник, 2 — песчано-глинистые сланцы, 3 — метаморфизованные сланцы, 4 — рудные метасоматиты, 5 — эндогенные и криогенные геохимические ореолы

Fig. 3. Cryogenic geochemical field anomalies on the surface of the Davydov Glacier at the epicenter of the ore body: 1 — glacier, 2 — sandy-clayey shales, 3 — metamorphosed shales, 4 — ore metasomatites, 5 — endogenous and cryogenic geochemical halos

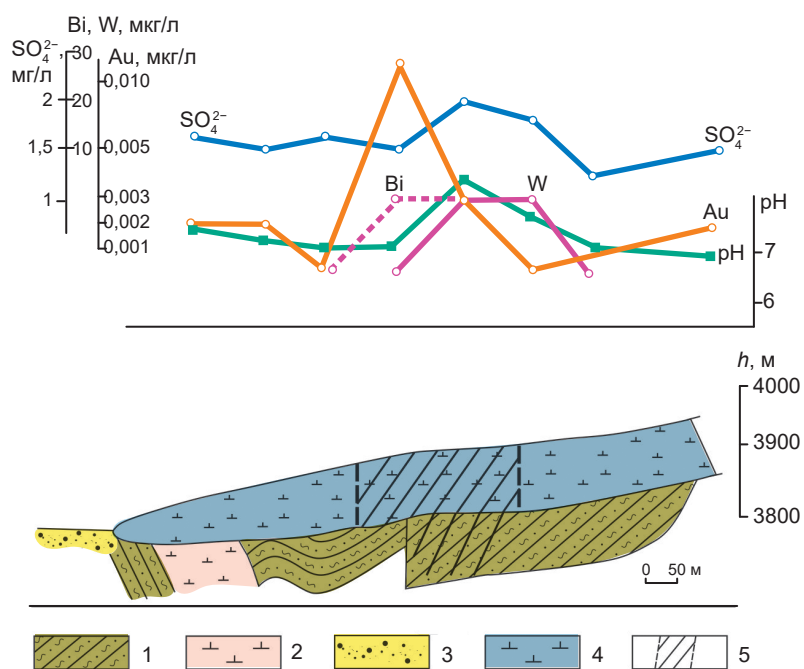


Рис. 4. Аномалии криогенного геохимического поля золоторудной минерализации на поверхности ледника Сары-Тор в эпицентре рудной зоны: 1 — песчано-глинистые сланцы, 2 — метаморфизованные сланцы, 3 — морена, 4 — ледник, 5 — эндогенные и криогенные геохимические ореолы

Fig. 4. Cryogenic geochemical field anomalies of the gold ore mineralization on the surface of the Sary-Tor glacier in the epicenter of the ore zone: 1 — sandy-clayey shales, 2 — metamorphosed shales, 3 — moraine, 4 — glacier, 5 — endogenous and cryogenic geochemical halos

сульфаты и величина окислительно-восстановительного потенциала Eh. Местами наблюдается смещение ореолов золота к языку ледника, которое на отдельных участках достигает 80 м. Ряд элементов-индикаторов Ag, Sn, Pb, Zn, Sc, Be (см. рис. 3) образует более контрастные аномалии на поверхности ледника над северо-восточной частью с обогащенно-го участка рудного тела.

Таким образом, в толще ледника, перекрывающего рудное тело, формируются наложенные криогенные геохимические ореолы элементов-индикаторов. Состав наложенных ореолов соответствует составу рудного тела и эндогенного ореола. Над более богатыми участками рудного тела в леднике образуются и более контрастные геохимические аномалии. Вертикальный диапазон миграции элементов-индикаторов и соответственно мощность наложенного ореола на леднике Лысый ограничиваются мощностью льда 50—60 м.

На юго-западном фланге месторождения находится ледник Сары-Тор. Его длина составляет около 5 км, ширина в среднем течении — около 1 км, периметр цирка ледника равен 5,5 км. В районе ледника рядом с ним и под ним в настоящее время разведана и частично отработана промышленная рудоносная зона. На момент геохимических исследований о наличии рудного тела под ледником было неизвестно.

На поверхности ледника Сары-Тор в нижней части его языка была обнаружена аномалия комплексного КГП элементов-индикаторов: Be, Cu, Zn, Sn, Cr, Pb, Mn, Tl, Au, Mo, TR (рис. 4).

Дальнейшими геолого-разведочными работами под ледником было вскрыто золоторудное тело, расположенное в проекции эпицентра геохимической аномалии. Протяженность аномалии на поверхности ледника от ее центра в направлении движения льда 50—100 м при мощности льда 165 м.

По уменьшению контрастности (относительно фоновых содер-

жаний в ледниках Ак-Шыйрака) микроэлементы в КГП ледника Сары-Тор располагаются в следующем ряду: Be, Cu (10) — Zn, Sn (6) — Cr, Pb (5) — Mn, Ti, W (4) — Au, Mo (3) — TR, Bi (2). КГП ледника Сары-Тор отличается слабой аномалией основных элементов — индикаторов оруденения W и Au. Концентрация золота в центре аномалии 50—100 м снижается до фоновой — 0,001 мкг/л. Низкая контрастность аномалий на поверхности ледника Сары-Тор может быть обусловлена сравнительно большим содержанием моренного обломочного материала во льдах его придонной части.

Район ледника Боорду, расположенного на юго-западном фланге Кумторского рудного поля, оценивается как перспективный на обнаружение рудного тела. На поверхности ледника в нижней части его языка было обнаружено комплексное КГП элементов, типоморфных для рудного тела и эндогенного ореола: Au, Cu, Zn, Mo, Sn, Pb, W, Bi, V, Cr, сульфаты (рис. 5). Протяженность аномалии на поверхности ледника от ее центра по направлению движения льда достигает 200—250 м над толщей льда мощностью 100 м.

Строение КГП на ледниках месторождения Кумтор характеризуется качественными (химические элементы и соединения) и количественными (концентрация элементов, протяженность ореолов) показателями, закономерно распределяющимися в толще льда на поверхности. Состав КГП ледников отражает состав рудных тел и эндогенных ореолов на месторождении Кумтор (табл. 2).

Образование локальных геохимических полей на поверхности ледника происходит в результате восходящей криогенной миграции химических элементов, в том числе и рудных, от рудного тела (эндогенного ореола) к поверхности в толще ледникового льда. Состав КГП соответствует составу рудного тела и эндогенного ореола (см. табл. 2). Над более богатыми участками рудного тела в леднике образуются и более контрастные геохимические аномалии. Вертикальный диапазон миграции элементов-индикаторов и соответственно мощность наложенного ореола ограничивается мощностью льда и колеблется от 50—60 м (ледник Лысый) до 165—175 м (ледники Давыдова, Петрова, Сары-Тор).

Мощность ледников континентальных и островных районов Арктики и Суб арктики может значи-

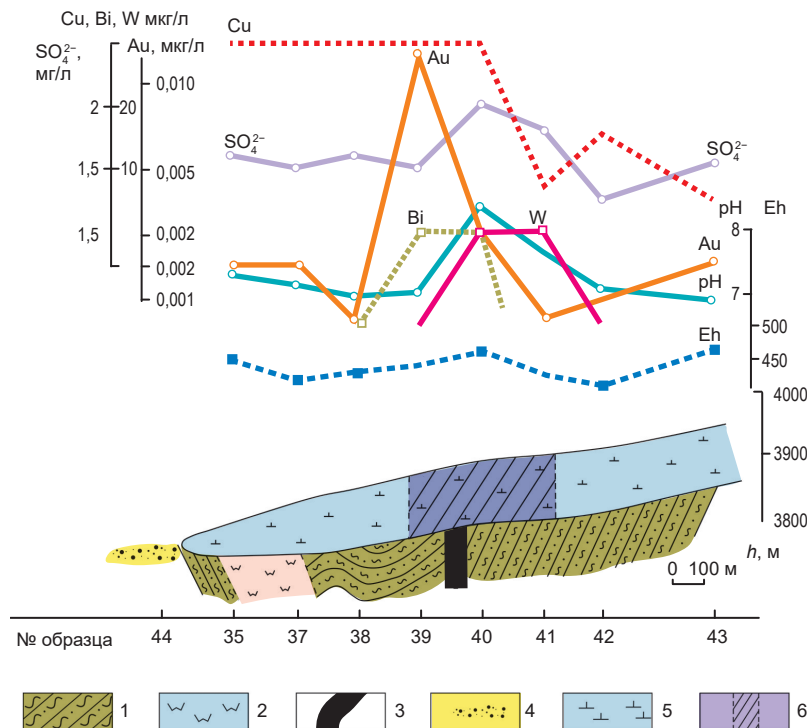


Рис. 5. Аномалии криогенного геохимического поля золоторудной минерализации на поверхности ледника Боорду в эпицентре рудной зоны: 1 — метаморфические сланцы, 2 — метасоматические породы, 3 — рудные метасоматиты, 4 — морена, 5 — ледник, 6 — криогенный геохимический ореол

Fig. 5. Cryogenic geochemical field anomalies of the gold ore mineralization on the surface of the Boordu glacier in the epicenter of the ore zone: 1 — metamorphic schists, 2 — metasomatic rocks, 3 — ore metasomatites, 4 — moraine, 5 — glacier, 6 — cryogenic geochemical aureole

тельно превышать толщину льда в районе месторождения Кумтор (табл. 3), особенно на арктических островах (Северная Земля, Земля Франца-Иосифа и др.).

Вертикальный диапазон распространения КГП теоретически может достигать сотен метров. Предельная мощность их проявления в Срединном Тянь-Шане (Кумтор) не установлена и ограничивается толщиной льда исследованных ледников — до 175 м [5; 7].

Процесс криогенной миграции химических элементов при формировании КГП аналогичен криогенному солевому рассеиванию рудных компонентов в многолетнемерзлых отложениях [13].

Разработанные российскими геохимиками [13; 14 и др.] представления об особенностях геохимических процессов в криолитозоне позволили выявить и исследовать неизвестное ранее явление криогенного солевого рассеивания рудных компонентов, заключающееся в том, что при отрицательной температуре в многолетнемерзлых рыхлых отложениях и льдах, перекрывающих рудные тела, происходит миграция рудных компонентов в направлении от рудного тела к поверхности земли (льда), обусловленная градиентом концентрации солей в незамерзающих свертонных пленках связанной воды. При

Таблица 2. Состав криогенных геохимических полей ледников и эндогенных ореолов на месторождении Кумтор**Table 2. Composition of cryogenic geochemical fields of glaciers and endogenous halos at the Kumtor deposit**

Ледник	Состав КГП на поверхности ледника	Протяженность КГП, м	Мощность ледника, м	Источник КГП, обнаруженный горными работами
Петрова	Au, W, V, Cr, Cu, Zn, Mo, Sn, Pb, Bi	250	70—173	Рудная минерализация
Лысый	Cu, Zn, W, Au, Cr	200	60	Рудное тело
Давыдова	Au, Pb, Cr, Cu, Mo, W, Sn, Na, S	200—600	85—175	Рудное тело
Сары-Тор	Be, Cu, Zn, Sn, Cr, Pb, Mn, Ti, Au, Mo, TR	50—100	165	Рудное тело
Боорду	Au, Cu, Zn, Mo, Sn, Pb, W, Bi, V, Cr, S	200—250	100	Рудная минерализация
№ 121 *	Au, W, Ag, Cr, Cu, Zn, Mo, Sn, Pb	100—150	50—60	Рудное тело
<i>Месторождение Кумтор [8; 11; 12]</i>				
Эндогенные геохимические ореолы	Au, Ag, Mo, W, Pb, Zn, Cu, Co, Ni, Ba, Ti, Mn, V, Be, K, Na			Рудное поле
	Au, Ag, Mo, W, K, Na			Рудное тело

* Небольшой висячий ледник в районе ледника Давыдова.

Таблица 3. Мощность ледников континентальных и островных районов Арктики и Субарктики, м**Table 3. Thickness of glaciers in continental and island regions of the Arctic and Subarctic, m**

Континентальные районы Субарктики		Островные районы Арктики	
Быранга	До 50	Остров Ушакова	250
Хребет Черского	До 100	Земля Франца-Иосифа	300—450
Полярный Урал	До 100—140	Новая Земля, ледник Норденшельда	300—400
Сунтар-Хаята	До 150	Северная Земля, остров Комсомолец	До 500
Камчатка	До 150—200	Де-Лонга	80—150
Чукотское нагорье	До 100	Северная Земля, остров Октябрьской Революции	До 200—400

этом формируются наложенные криогенные ореолы рассеяния над глубокозалегающими рудными объектами.

Высокая скорость формирования геохимических полей, их морфология и характер распределения положительно и отрицательно заряженных ионов во льдах на поверхности ледников удовлетворительно объясняются электрохимической моделью их образования [15—17].

Формирование локальных КГП рудных тел на ледниках делает возможными поиски месторождений полезных ископаемых, перекрытых мощными толщами ледниковых покровов. Ледниковые системы на территории Арктики и Субарктики России занимают площадь около 53 тыс. км², в пределах которой могут быть обнаружены крупные месторождения полезных ископаемых. Первоначальными районами поисков с применением КГП могут быть полуостров Таймыр и острова архипелага Северная Земля, обладаю-

щие существенным золоторудным потенциалом [18]. В первую очередь это остров Большевик, который рассматривается как новый район, перспективный в отношении открытия крупного золоторудного месторождения и добычи рудного золота в российской Арктике [19; 20]. Вопрос развития добычи золота на острове весьма актуален и включен во все государственные программные документы по развитию Арктической зоны России. В юго-восточной части острова Большевик выделена наиболее перспективная площадь совмещения проявлений золоточерносланцевой и золото кварцевой рудных формаций. Все ручьи и реки в этой части острова содержат россыпное золото (самые северные известные в мире россыпи), а его ежегодная добыча составляет до 500 кг [21]. При этом в большинстве случаев известные рудопроявления коренного золота расположены ниже по течению рек относительно основных участков россыпей золота, тяготеющих к внутренней части остро-

ва, занятой ледниками [19]. Поэтому первоначальными объектами исследований могут быть ледники Кропоткина или Ленинградский, перекрывающие эту малоисследованную часть острова.

Поиски скрытых под ледниковыми покровами месторождений полезных ископаемых путем изучения КГП предпочтительно проводить на стадии 1 при геохимическом картировании в ходе регионального геологического изучения недр и прогнозирования полезных ископаемых и на стадии 2 при поисках и оценке месторождений на новых или недостаточно изученных площадях с целью выявления месторождений полезных ископаемых [22]. Возможно применение метода поисков по КГП при прогнозно-ревизионных работах в ледниковых районах.

Заключение

Проведенные исследования показали, что для решения поставленных задач поисков рудных месторождений на территориях Арктики и Субарктики, закрытых ледниками, перспективно применение геохимических методов.

Геохимические исследования проведены на высокогорном золоторудном месторождении Кумтор, Срединный Тянь-Шань (Киргизия). Климатические условия района отличаются суровостью с отрицательной среднегодовой температурой $-7,8^{\circ}\text{C}$, что сопоставимо с условиями Арктики (Новая Земля и др.). Работы были сосредоточены на ледниках холодного и теплого типа: Петрова, Сары-Тор, Давыдова, Лысый, № 354 и Боорду, перекрывающих минерализованную зону и рудные тела месторождения. Установлено, что во льдах ледников в эпицентрах рудных тел формируются аномалии криогенных геохимических полей. Строение КГП на ледниках месторождения Кумтор характеризуется качественными (химические элементы и соединения) и количественными (концентрация элементов, протяженность ореолов) показателями, закономерно распределяющимися в толще льда на поверхности. Химический состав КГП ледников отражает состав рудных тел и эндогенных ореолов золото-вольфрамового месторождения Кумтор.

КГП формируются на поверхности ледников в эпицентрах рудных тел при установленной мощности льда до 175 м. Протяженность аномалий КГП на поверхности ледников от эпицентра по направлению движения льда колеблется от 50—100 до 600 м.

Формирование КГП рудных тел на ледниках делает возможными поиски месторождений полезных ископаемых, перекрытых мощными толщами ледниковых покровов в арктических и субарктических районах России. Ледниковые системы на этих территориях занимают площадь около 53,0 тыс. км², в пределах которой могут быть обнаружены крупные месторождения.

Первоочередными районами поисков в Арктике с применением КГП могут быть полуостров Таймыр и острова архипелага Северная Земля (остров Большевик), обладающие существенным золоторудным

потенциалом. Юго-восточная часть острова Большевик наиболее перспективна на открытие крупного золоторудного месторождения. Поэтому первоначальными объектами исследований по КГП могут быть ледники Кропоткина или Ленинградский, перекрывающие эту малоисследованную часть острова.

Финансирование

Исследование проводилось при поддержке комплексной программы фундаментальных научных исследований Института машиностроения Сибирского отделения РАН (проект СО РАН AAAA-A20-120111690008-9).

Литература/References

1. Галямов А. Л., Волков А. В., Лобанов К. В., Мурашов К. Ю. Перспективы выявления месторождений стратегических металлов в Арктической зоне России // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 1 (25). — С. 59—74. — DOI: 10.25283/2223-4594-2017-1-59-74.
Galyamov A. L., Volkov A. V., Lobanov K. V., Murashov K. Yu. Prospects for Identifying Strategic Metal Deposits in the Arctic Zone of Russia. Arctic: Ecology and Economy, 2017, no. 1 (25), pp. 59—74. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-1-59-74. (In Russian).
2. Kaminsky V. D., Suprunenko O. I., Smirnov A. N. Mineral and raw materials resources of the Arctic continental outskirts of Russia and the prospects for their development. Arctic: Ecology and Economy, 2014, no. 3 (15), pp. 52—61.
3. Хромова Т. Е., Носенко Г. А., Глазовский А. Ф. и др. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016—2019 гг.) // Лед и Снег. — 2021. — Т. 61, № 3. — С. 341—358. — DOI: 10.31857/S2076673421030093.
Khromova T. E., Nosenko G. A., Glazovsky A. F., Muravyov A. Ya., Nikitin S. A., Lavrentiev I. I. New Catalog of Russian Glaciers Based on Satellite Data (2016—2019). Ice and Snow, 2021, vol. 61, no. 3, pp. 341—358. DOI: 10.31857/S2076673421030093. (In Russian).
4. Волков А. В., Галямов А. Л. Перспективы горнодобывающей промышленности Гренландии // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 2 (22). — С. 24—34.
Volkov A. V., Galyamov A. L. Prospects for the mining industry in Greenland. Arctic: Ecology and Economy, 2016, no. 2 (22), pp. 24—34. (In Russian).
5. Петраков Д. А., Коваленко Н. В., Лаврентьев И. И., Усубалиев Р. А. Толщина, объем и последние изменения ледника Сары-Тор (массив Ак-Шыйрак, Внутренний Тянь-Шань) // Криосфера Земли. — 2014. — Т. 28, № 3. — С. 91—100.
Petrakov D. A., Kovalenko N. V., Lavrentiev I. I., Usubaliev R. A. Thickness, volume, and recent changes in the Sary-Tor glacier (Ak-Shyirak massif, Inner Tien Shan). Earth's Cryosphere, 2014, vol. 28, no. 3, pp. 91—100. (In Russian).
6. Семенов И. Н. Физико-географическая характеристика архипелага Новая Земля (лите-

- ратурный обзор) // Почвоведение. — 2021. — № 10. — С. 1207—1230. — DOI:10.13140/RG.2.2.15583.20642.
- Seменов I. N.* Physical and geographical characteristics of the Novaya Zemlya archipelago (literature review). *Soil Science*, 2021, no. 10, pp. 1207—1230. DOI: 10.13140/RG.2.2.15583.20642.
7. Ермолин Е. Д., Немов А. Е., Попов М. В. Мерзлотно-геотермическая характеристика месторождения Кумтор // Геокриологические исследования в горах. — Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1989. — С. 31—40.
- Ermolin E. D., Nemov A. E., Popov M. V.* Permafrost-geothermal characteristics of the Kumtor deposit. *Geocryological studies in the mountains*. Yakutsk, Permafrost Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1989, pp. 31—40. (In Russian).
8. Шевкунов А. Г., Гуда А. А., Скорынина А. А., Макнайт С. В. Исследование минерального состава руд месторождения Кумтор (Срединный Тянь-Шань) методами QXRD и XRF // Минералогия. — Т. 8, № 3. — 2022. — С. 79—101.
- Shevkunov A. G., Guda A. A., Skorynina A. A., McKnight S. V.* Study of the mineral composition of ores at the Kumtor deposit (Middle Tien Shan) using the QXRD and XRF methods. *Mineralogy*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 79—101. (In Russian).
9. Макаров В. Н. Геохимические поиски месторождений, перекрытых ледниками. — Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, 1—3.04.14 г. — Якутск: Изд. дом СВФУ, 2014. — С. 271—276.
- Makarov V. N.* Geochemical prospecting for deposits covered by glaciers. *Geology and mineral resources of North-East Russia: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference*, 1—3.04.14. Yakutsk, Publishing house of NEFU, 2014, pp. 271—276. (In Russian).
10. Катлер Р. Крупнейшее золоторудное месторождение Кыргызстана теряет свой блеск // *Asia Times*. — 2012. — 21 июля.
- Cutler R.* Kyrgyzstan's largest gold deposit is losing its shine. *Asia Times*, 2012, July 21. (In Russian).
11. Никоноров В. В., Караев Ю. В., Борисов Ф. И. и др. Золото Кыргызстана. — Кн. 2: Описание месторождений. Рудные. — Бишкек: Наси, 2004. — 272 с.
- Nikonorov V. V., Karaev Yu. V., Borisov F. I., Tolsky V. I., Zamaletdinov T. S., Larina T. V., Gorbaneva T. V.* Gold of Kyrgyzstan. B. 2. Description of deposits. Ore. Bishkek, Nasi, 2004 p. (In Russian).
12. Торгоев И. А. Ледники, золото и геоэкология Кумтора. — Рига: Lambert Academic Publ., 2017. — 204 с.
- Torgoev I. A.* Glaciers, gold and geoecology of Kumtor. Riga, Lambert Academic Publ., 2017, 204 p. (In Russian).
13. Макаров В. Н. Геохимические поля в криолитозоне. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 1998. — 116 с.
- Makarov V. N.* Geochemical fields in the permafrost zone. Yakutsk, Publ. house of the Institute of Permafrost Science SB RAS, 1998, 116 p. (In Russian).
14. Мельников П. И., Иванов О. П., Макаров В. Н. и др. Явление криогенной миграции химических элементов и его значение для поисков месторождений в районах многолетней мерзлоты // Докл. АН СССР. — 1988. — Т. 303, № 4. — С. 963—967.
- Melnikov P. I., Ivanov O. P., Makarov V. N., Pitulko V. M., Shvartsev S. L.* The Phenomenon of Cryogenic Migration of Chemical Elements and Its Significance for Exploring Deposits in Permafrost Regions. *Doklady Akad. Sci.*, 1988, vol. 303, no. 4, pp. 963—967. (In Russian).
15. Макаров В. Н. Естественные электрические поля и электрохимические аномалии на месторождениях полезных ископаемых в криолитозоне // Якупов В. С. Геофизика криолитозоны. — Якутск: Изд-во Якут. ун-та, 2008. — С. 228—235.
- Makarov V. N.* Natural Electric Fields and Electrochemical Anomalies at Mineral Deposits in the Cryolithozone. In: *Yakupov V. S.* Geophysics of the Cryolithozone. Yakutsk, Yakutsk Univ. Press, 2008, pp. 228—235. (In Russian).
16. Рысс Ю. С. Геоэлектрохимические методы разведки. Введение в геоэлектрохимию. — Л.: Недра, 1983. — 255 с.
- Ryss Yu. S.* Geoelectrochemical Exploration Methods. Introduction to Geoelectrochemistry. Leningrad, Nedra, 1983, 255 p. (In Russian).
17. Макаров В. Н. The geochemical phenomenon — local geochemical fields in a glacier. *Environmental Research in the Arctic 2000. Memoirs of National Institute of Polar Research*. 2001, Special Issue, no. 54. Tokyo, Japan, pp. 271—278.
18. Проскурнин В. Ф. Минерогенический анализ Таймыро-Североземельского региона и оценка его золотоносного потенциала: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. — СПб., 2013. — 40 с.
- Proskurnin V. F.* Minerogenic Analysis of the Taimyr-Severnaya Zemlya Region and Assessment of Its Gold-Bearing Potential: Abstract of the dissertation of Dr. Geol.-Mineralogist. sciences. Saint Petersburg, 2013, 40 p. (In Russian).
19. Волков А. В. Золото острова Большевик // Золото и технологии. — 2020. — № 2. — С. 20—27. — URL: https://zolteh.ru/regions/zoloto_ostrova_bolshevik.
- Volkov A. V.* Gold of Bolshevik Island. *Gold and Technology*, 2020, no. 2, pp. 20—27. Available at: https://zolteh.ru/regions/zoloto_ostrova_bolshevik. (In Russian).
20. Самойлов А. Г., Проскурнин В. Ф., Романов А. П. Сырьевая база рудного золота острова Большевик // Минер. ресурсы России. Экономика и управление. — 2016. — № 1—2. — С. 42—47.
- Samoilov A. G., Proskurnin V. F., Romanov A. P.* Raw Material Base of Bolshevik Island Ore Gold. *Mineral Resources of Russia. Economy and Management*, 2016, no. 1—2, pp. 42—47. (In Russian).

21. Рочев Н. В., Ванюнин Н. В., Листков А. Г. и др. Перспективы освоения ресурсов Большевикского рудно-россыпного района Таймыро-Североземельской золотоносной провинции // Гор. пром-сть. — 1999. — № 2. — С. 20—22.

Rochev N. V., Vanyunin N. V., Listkov A. G., Benz M. I., Lazarev F. D. Prospects for the Development of Resources of the Bolshevistsky Ore-Placer District of the Taimyr-Severozemelskaya Gold Province. Mining Industry, 1999, no. 2, pp. 20—22. (In Russian).

22. Положение о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (твердые полезные ископаемые). — Утв. распоряжением МПР РФ от 5 июля 1999 г. № 83-р. — М.: МПР РФ, 1999. Regulations on the Procedure for Conducting Geological Exploration Work by Stages and Phases (Solid Minerals). Approved by Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated July 5, 1999, no. 83-r. Moscow, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, 1999. (In Russian).

Информация об авторе

Макаров Владимир Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт мерзлотоведения Сибирского отделения РАН (667010, Россия, Якутск, Мерзлотная ул., д. 36), e-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru.

GEOCHEMICAL EXPLORATION POSSIBILITY FOR MINERAL DEPOSITS HIDDEN UNDER GLACIERS IN THE ARCTIC REGIONS

Makarov, V. N.

Institute of Permafrost Studies of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Yakutsk, Russian Federation)

The article was received on December 14, 2025

For citing

Makarov V. N. Geochemical exploration possibility for mineral deposits hidden under glaciers in the Arctic regions. Arctic: Ecology and Economy, 2026, vol. 16, no. 3, pp. 398—408. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-398-408.

Abstract

Based on the results of geochemical studies conducted in the area of the high-mountain gold ore deposit Kumtor (Middle Tien Shan), the author concludes that it is possible to explore for ore deposits hidden under glaciers in the Arctic. The study covers both cold and warm glaciers: Petrov, Sary-Tor, Davydov, Lysy, No. 354 and Boordu, overlapping gold-tungsten-sulfide ore bodies of the Kumtor deposit. It has been established that cryogenic geochemical fields (CGF) are formed in the ice on the surface of glaciers in the epicenter of ore bodies. The structure of the CGF on glaciers of the Kumtor deposit is characterized by qualitative (chemical elements and compounds) and quantitative (concentration of elements, extent of halos) indicators, regularly distributed in the ice on the surface of glaciers. The chemical composition of the glacier CGF reflects the composition of ore bodies and endogenous halos of the Kumtor deposit. The paper characterizes the features of the CGP formed on the surface of glaciers at the epicenters of ore bodies with an established ice thickness of up to 175 m. The extent of geochemical anomalies of the CGP on the surface of glaciers from the epicenter of the ore body in the direction of ice movement varies from 50-100 to 600 m. Recommendations are given for the use of the CGP in forecasting and exploration work in the glacial regions of the Arctic.

Keywords: Arctic regions of Russia, glaciers, geochemical anomalies, material and mineral composition, ore deposits, gold, tungsten.

Funding

The research was supported by the comprehensive program of fundamental scientific research of the Institute of Mechanical Engineering of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Project SB RAS AAAA-A20-120111690008-9).

Information about the author

Makarov, Vladimir Nikolaevich, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Chief Researcher, Institute of Permafrost Studies Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (36, Merzlotnaya St., Yakutsk, Russia, 667010), e-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru.

© Makarov V. N., 2026