

## Геохимические поиски месторождений полезных ископаемых под ледниками

**Аннотация.** Рассматриваются результаты геохимических исследований, проведённых в районе высокогорного золоторудного месторождения Кумтор (Срединный Тянь-Шань). Работы были сосредоточены на ледниках холодного и тёплого типа: Петрова, Сары-Тор, Давыдова, Лысый, № 354 и Боорду, перекрывающих минерализованную зону и рудные тела. Установлено, что во льдах ледников над рудными телами формируются криогенные геохимические поля (КГП). Строение КГП на ледниках месторождения Кумтор характеризуется качественными (химические элементы и соединения) и количественными (концентрация элементов, протяжённость ореолов) показателями, закономерно распределяющимися в толще льда, на поверхности. 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. Протяжённость 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.

**Ключевые слова:** месторождения полезных ископаемых, золото, криогенные геохимические поля, ледники, геохимические поиски.

МАКАРОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, профессор, vnmakarov@mpi.ysn.ru

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск

## Geochemical prospecting for mineral deposits under glaciers

V. N. MAKAROV

P. I. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk

**Annotation.** The article considers results of geochemical studies conducted in the region of the high-mountain Kumtor gold deposit in the Middle Tien Shan. The work was focused on glaciers of the cold and warm types: the Petrov, Sary-Tor, Davydov, Lysy, No. 354, and Boordu ones, that overlap the mineralized zone and ore bodies. It was revealed that cryogenic geochemical fields (CGF) are formed in the ice of glaciers above the ore bodies. The structure of the CGF in the glaciers of the Kumtor deposit is characterized by qualitative (complex of chemical elements and compounds) and quantitative (concentration of the elements, extent of the halos) indicators, regularly distributed in the ice mass on the surface. The chemical composition of the CGF in the glaciers reflects the composition of the ore bodies and endogenous halos of the Kumtor deposit. The features of the CGF formed in the epicenters of ore bodies on surfaces of the glaciers with an established ice thickness of up to 175 m have been characterized. The extension of the CGF geochemical anomalies on the glacier surfaces from an ore body epicenter in the ice movement direction varies from 50–100 to 600 m. Recommendations are provided for the use of CGF in forecasting and prospecting work in glacial areas.

**Key words:** mineral deposits, gold, cryogenic geochemical fields, glaciers, geochemical prospecting.

**Введение.** Крупные и легко открываемые месторождения полезных ископаемых в России почти исчерпаны, поэтому геологи вынуждены продвигаться всё 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 закрытых районах, на территориях которых могут быть выявлены не только новые объекты, в том числе и не выходящие на поверхность,

но и принципиально новые рудные и, возможно, россыпные районы. К закрытым районам в пределах России относятся и ледниковые районы: это в основном покрытые ледниками острова российской Арктики и горные районы Севера, Северо-Востока Сибири, Коряцкого нагорья и Камчатки.

Согласно созданной в Институте географии РАН базе данных «Ледники России» [11], общая площадь закрытых ледниками районов в России составляет 54,5 тыс. км<sup>2</sup> или около 0,3 % территории страны (рис. 1).

По данным той же базы, на территории Российской Федерации в настоящее время находятся 7478 ледников, сгруппированных в 22 ледниковые системы, общая площадь оледенения составляет 54 531 км<sup>2</sup>. Самые крупные по площади ледниковые системы расположены на архипелагах Новая Земля (более 22 тыс. км<sup>2</sup>), Северная Земля (16,5 тыс. км<sup>2</sup>) и Земля Франца-Иосифа (12,5 тыс. км<sup>2</sup>). Следующая по размеру ледниковая система площадью около 10 тыс. км<sup>2</sup> расположена в горах Кавказа. В диапазон площадей

от 500 до 1000 км<sup>2</sup> попали два ледниковых района – Камчатка (683 км<sup>2</sup>) и Алтай (523 км<sup>2</sup>). Площадь ледников на арктическом острове Ушакова, в горах Сунтар-Хаята и Корякском нагорье примерно одного порядка – от 100 до 300 км<sup>2</sup>. Самая многочисленная группа – это небольшие ледниковые системы, площадь которых колеблется от 10 до 100 км<sup>2</sup>. Они расположены в разных гляциологических зонах – полярной (острова Де-Лонга) и субполярной (Урал, Плато Путорана, Горы Быранга, Хребет Черского, Чукотское и северо-восток Корякского нагорья), в умеренном поясе (Хребет Кодар, Восточный Саян). Самые маленькие по площади (менее 10 км<sup>2</sup>) ледниковые системы – хребет Орулган и Колымское нагорье, Кузнецкий Алатау, а также Баргузинский и Байкальский хребты.

На закрытых ледниками территориях могут находиться и быть выявлены новые крупные объекты. Примером такого объекта, частично расположенного под мощной толщей ледниковых льдов, является золоторудное месторождение Кумтор.

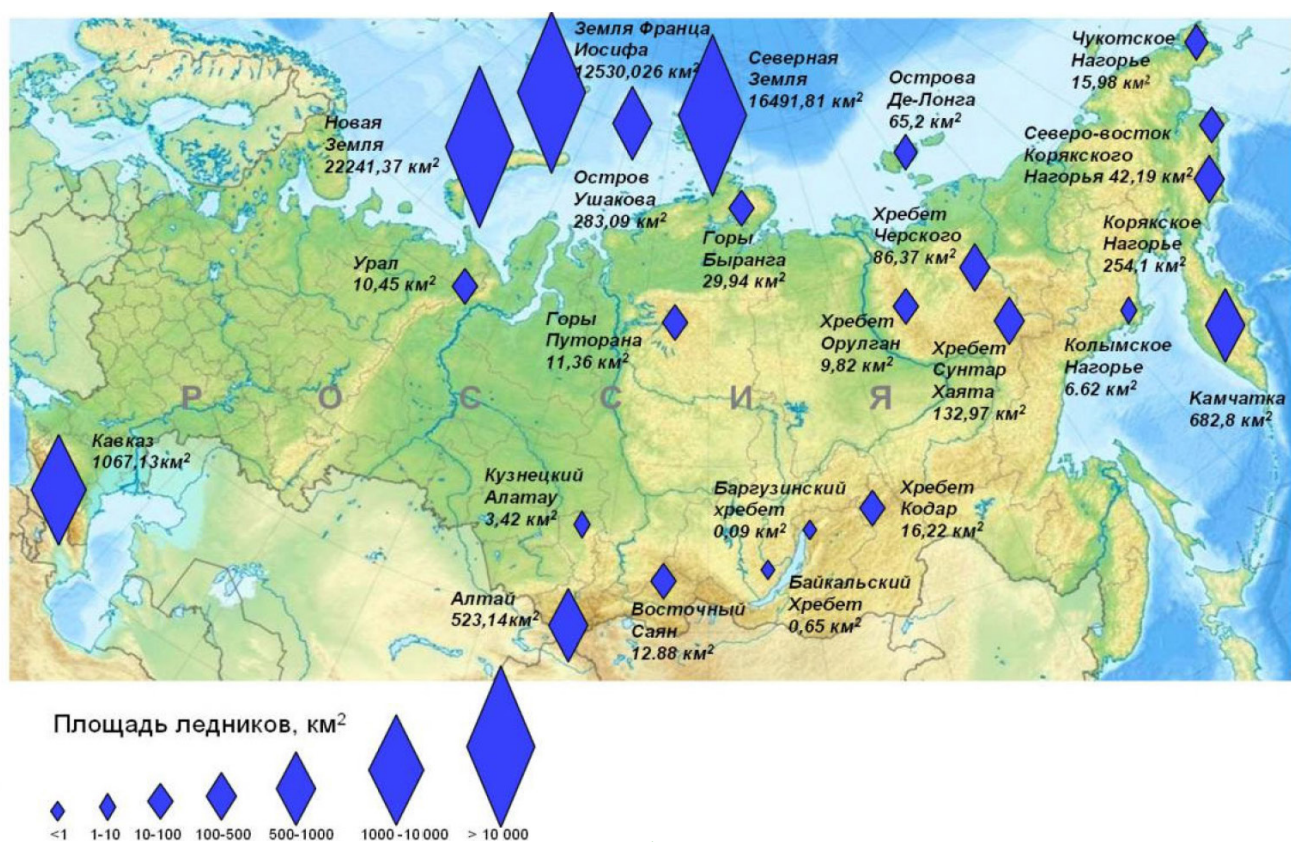


Рис. 1. Площадь современных ледников на территории России, 2016–2019 гг. [11]



Рис. 2. Хребет Ак-Шийрак, Кумтор

(<https://web.archive.org/web/20161013025350/http://www.panoramio.com/photo/154350>)

Оно находится в Иссык-Кульской области в 350 км от столицы Кыргызской Республики – Бишкека. Месторождение расположено в восточной части Срединного Тянь-Шаня на северо-западном макросклоне ледникового массива Ак-Шийрак (рис. 2), на высоте свыше 4000–4200 метров над уровнем моря, в зоне вечной мерзлоты.

Горный массив Ак-Шийрак представляет собой слаборасчленённое 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.

Табл. 1. Мощность льда ледников массива Ак-Шийрак в районе месторождения Кумтор, [9]

| Ледники  |             | Мощность льда, м |              |
|----------|-------------|------------------|--------------|
|          |             | Средняя          | Максимальная |
| Петрова  |             | 70               | 173          |
| Лысый    |             | 60               | –            |
| Давыдова | Восточный   | 90               | 175          |
|          | Центральный | 100              | 160          |
|          | Западный    | 85               | 170          |
| Сары-Тор |             | –                | 165          |
| Боорду   |             | 100              | –            |

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

Климатические условия связаны с внутригорным положением района. Рассматриваемый район характеризуется значительной континентальностью и суровостью климата с отрицательной среднегодовой температурой  $-7,8^{\circ}\text{C}$ , что сопоставимо с суровыми климатическими условиями Арктики (Новая Земля). Наиболее холодным месяцем является январь, а самым тёплым – июль. Абсолютный температурный минимум составляет  $-45^{\circ}\text{C}$ . Среднемноголетнее годовое количество атмосферных осадков на 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 тёплый период, причём большая их часть в виде снега, и только 8 % от годового количества приходятся на жидкие осадки, которые отмечаются 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 [1].

Главная водная артерия – река Кумтор и её левые притоки речки Сарытор и Боорду. Зимой (декабрь–февраль) реки промерзают до дна.

Золоторудное месторождение Кумтор по своим запасам является уникальным месторождением





Рис. 3. Золотосеребряный рудник Паскуа-Лама, Чили, Аргентина

(<https://yandex.ru/images/search?lr=116114&source=serp&stype=image&text=Pascua%20Lama%20mine>)

«мирового класса». Оно входит в пятёрку крупнейших в мире рудников по запасам золота: подтверждённые и прогнозируемые запасы составляют порядка 700 тонн. Такими ресурсами (свыше 100 тонн золота) обладают только 10 % месторождений мира, но на их долю приходится 86 % всех мировых запасов золота. С 1992 г. эксплуатацию месторождения вела канадская компания Centerra Gold, которая владела 100 % золотого рудника Кумтор через свою дочернюю компанию Kumtor Gold Company. Оработка месторождения осуществлялась открытым способом с применением общепринятых методов бурения, взрывных работ, погрузки и транспортировки. Ежегодно добывалось около 18 тонн золота, до 23,2 тонн золота в рекордном 2001 г. Всего, с начала промышленного производства в мае 1997 г. по 30 июня 2022 г., на Кумторе добыто более 430 тонн золота [13].

Золоторудное месторождение Кумтор – одно из самых высокогорных месторождений в мире, наряду золотосеребряным рудником Паскуа-Лама [15], расположенным на высотах 4800–5200 м (рис. 3).

Объекты рудника Кумтор расположены на высотах 3600–4400 м над уровнем моря в нивально-гляциальном поясе Тянь-Шаня. В геологическом отношении район находится в Нарынской миогеосинклинальной зоне каледоно-герцинской складчатой области Срединного Тянь-Шаня.

Геологические изыскания велись в этой местности с 1920-х годов. Но само месторождение было открыто геологами Б. А. Резниковым и В. В. Бурцевым, сотрудниками геофизической экспедиции «Киргизгеология» в 1978 г., разработка началась в 1990-е годы. Запасы золота оценены как колоссальные – 953 тонны. Однако освоение месторождения было отложено из-за высокой стоимости проекта – около 1,46 млрд долларов США на тот момент.

Геологическое строение района месторождения определяется его принадлежностью к миогеосинклинальной зоне каледоно-герцинской складчатости Тянь-Шаня. На древнем гранито-гнейсовом 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 простиранию 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 ледников Давыдова, Сары-Тор, Лысый, Петрова, № 354, Боорду. В настоящее время разрабатываемое рудное золотоносное тело залегает около и под ледниками Лысый, Давыдова и Сары-Тор; перспективны фланговые участки: Петрова, Боорду и другие.

Вмещающие золотое оруденение породы месторождения представляют собой толщу серых филлитов хлорит-(полевошпат)-кварц-серицитового состава с пачками углистых пород, карбонатно-филлитовых ритмитов и конгломератосланцев. Собственно рудные зоны представляют собой чередование интервалов интенсивного прожилкования (штокверков) в разнообразных филлитах с интервалами метасоматически преобразованных филлитов.

Рудные тела представлены линейными минерализованными зонами с вкрапленно-прожилковым и штокверковым оруденением, имеющим чёткий 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. Вокруг рудных тел – продуктивных золото-вольфрам-сульфидных «залей» пирит-полевошпат-карбонатных метасоматитов – возникли первичные ореолы рассеяния рудных элементов Au, Ag, Mo W, K, Na.

Возможности геохимических поисков рудных тел, перекрытых ледниками, изучались на золоторудном месторождении Кумтор в 1988–1989 гг. Геохимические поля исследовались на ледниках, расположенных в восточной части внутреннего Тянь-Шаня (Киргизия). Геологоразведочные работы на месторождении в это время находи-

лись 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.

Изучение геохимических полей проводилось на ледниках холодного и тёплого типа. Ледники холодного типа подстилаются горными породами с отрицательной температурой, и мёрзлая толща имеет двухъярусное строение: верхний ярус – сам ледник, нижний – скальные породы. Ледники тёплого типа подстилаются породами с положительными температурами. В температурном разрезе ледников выделяется верхняя зона мощностью 10–15 м с температурами  $-4...-5^{\circ}\text{C}$ , затем до глубины 25–30 м наблюдается резкое повышение температуры до  $-1...-0,6^{\circ}\text{C}$ , ниже до подошвы ледника отмечается практически безградиентная изотермическая кривая с температурой около нуля.

**Методы исследований.** Геохимические исследования проведены на северо-западном макросклоне хребта Ак-Шийрак в районе Кумторского золоторудного месторождения. Работы были сосредоточены на ледниках холодного и тёплого типа: Петрова, Сары-Тор, Давыдова, Лысый, № 354 и Боорду, перекрывающих Главную минерализованную зону и рудные тела. На момент геохимических исследований геологоразведочные работы на месторождении Кумтор были локализованы в районе ледника Давыдова.

Полевые геохимические работы проведены в 1988–1989 гг. на стадии поисково-разведочных работ на месторождении Кумтор. В этот период только в центральной части месторождения в районе ледника Давыдова, на левом борту долины, велись канавные горные работы, со льда ледника была пробурена скважина.

Вдоль каждого из ледников (с его вершины до языка) были пройдены поисковые маршруты, с отбором проб льда с поверхности ледника сразу под фирном. Всего на ледниках отобраны 93 пробы льда. Расстояние между пробами составляло от 50–100 до 200 м. Вес пробы льда (1,0–1,5 кг) ограничивался необходимым объёмом растопленного льда для планируемого анализа воды – один литр. Таяние льда и упаковка воды в химически чистые ёмкости проводились при комнатной температуре в пос. Кумтор на полевой базе высокогорной лаборатории Института мерзлотоведения (ИМЗ) СО РАН.

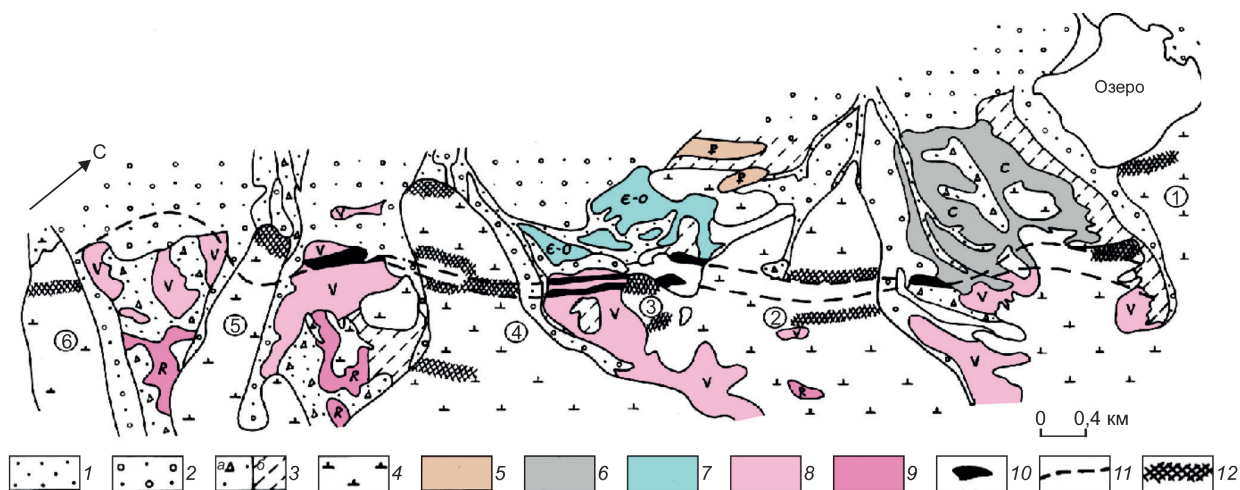


Рис. 4. Криогенные геохимические поля на поверхности ледников Кумторского рудного поля:

кайнозойские отложения: 1 – аллювиальные, галечники, пески, 2 – элювиально-делювиальные, щебень, дресва, пески, 3 – ледниковые (а) и делювиально-пролювиальные (б), валуны, галька, щебень, пески, суглинки, 4 – ледниковые льды – ледники (числа в кружках): 1 – Петрова, 2 – Лысый, 3 – Давыдова, 4 – Сары-Тор, 5 – Боорду, 6 – № 354; геологические образования: 5 – палеогеновые и 6 – нижнекарбоновые песчаники, алевроиты; 7 – кембрийско-ордовикские известняки; 8 – вендские сланцы, филлиты; 9 – рифейские вулканогенно-осадочные отложения; 10 – рудные тела; 11 – разрывные нарушения; 12 – криогенные геохимические поля

Аналитическая обработка геохимических проб проведена в г. Якутске. Полный химический анализ воды (льда) выполнен в лаборатории геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аналитики Л. Ю. Бойцова, О. В. Шепелева), приближённо-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». Чувствительность анализа на растворённое золото 0,001 мкг/л.

**Результаты и обсуждение.** Геохимическими исследованиями было установлено, что на поверхности льда ледников, перекрывающих минерализованную зону и рудные тела, наблюдаются комплексные аномалии элементов-индикаторов золоторудной минерализации. Образование геохимических аномалий на поверхности ледников обусловлено формированием наложенных криогенных геохимических ореолов 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, установ-

лены чёткие геохимические аномалии элементов, определяющих геохимические особенности системы, типоморфных для рудного тела и эндогенного ореола: Au, W, Pb, Cr, Cu, Sn (рис. 4).

Ореолы золота и типоморфных элементов (W, Pb, Cr, Cu, Sn) располагаются на поверхности ледников в эпицентре, непосредственно над проекцией рудной зоны, протяжённость аномалий по направлению движения ледника обычно 150–200 м, иногда достигает его языка (см. рис. 4).

Юго-западный фланг Центрального участка месторождения перекрывается ледником Давыдова (рис. 5).

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, температура льда составляет  $-6^{\circ}\text{C}$  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 разделён вдоль на две ветви срединной мореной. Ветви ледника обладают разной активностью. Поверхностная скорость движения правой ветви ледника в летнее время составляет



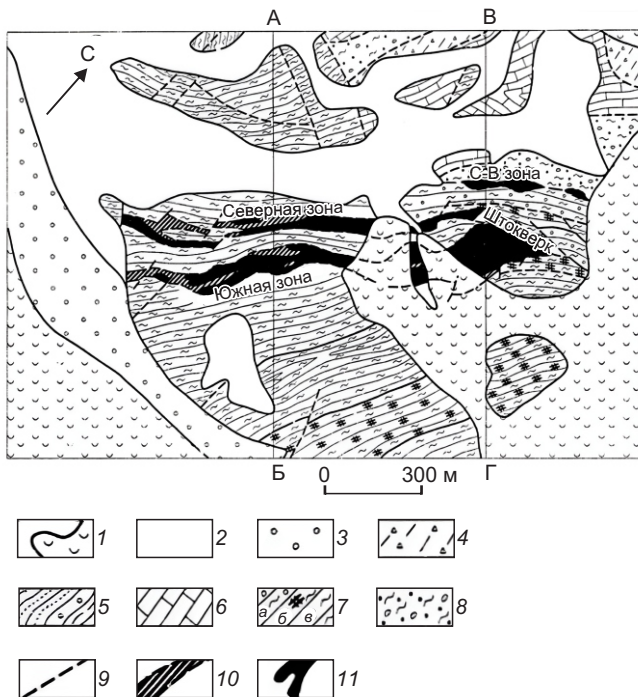


Рис. 5. Схема геологического строения Центрального участка месторождения Кумтор [12]:

1 – ледники; отложения: 2 – современные, 3 – моренные,  $Q_{II-IV}$ ; 4 – красноцветные глины, конглобрекции,  $P_3-N_1$ ; 5 – флиш и моласса,  $C_1$ ; 6 – известняки,  $\epsilon$ ; 7 – кварц-серицит-хлоритовые сланцы (а), переслаивание сланцев и известняков (б), тиллоподобные конгломераты (в),  $\epsilon$ ; 8 – меланж: филлиты (V), известняки и кремни ( $\epsilon$ ), песчаники ( $C_1$ ) в чёрном углисто-глинистом матриксе; 9 – герцинские взбросы и взбросо-надвиги; 10 – контуры рудных зон, представленных кварц-карбонат-пиритовыми метасоматитами, V; 11 – промышленное оруденение

1–2 см/сутки; левая более активна – 1–4 см/сутки. 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 у нижнего края до 150 см на высоте границы питания, при плотности 0,36 г/см<sup>3</sup>.

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

В придонной части лёд 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 его поверхности фиксируются чёткие 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-Шийрак 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. Протяжённость 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. 5), с суммарной мощностью около 0,3 км, формируют общую аномальную область протяжённостью около 600 м по золоту и до 900 м по сульфатам (рис. 6).

Аномалии элементов-индикаторов золоторудной минерализации на поверхности ледника Давыдова формируются как над рудным телом, так и над 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 [3].

В пределах ореола, сформированного над рудной зоной, отмечается повышенное содержание ионов натрия и сульфатов. Причём если несколько более контрастные ореолы сульфатов и натрия фиксируются над правой ветвью ледника Давыдова, то над левой его частью отмечаются повышенные содержания большинства тяжёлых металлов. Протяжённость ореолов также увеличивается над левой ветвью ледника. Например, для ореолов золота она возрастает почти вдвое – с 0,7 до 1,4 км (см. рис. 3). При этом мощность льда заметно больше именно над левой ветвью ледника Давыдова. Большая протяжённость аномалий и их комплексность свидетельствуют об усложнении структуры рудной зоны под ледником

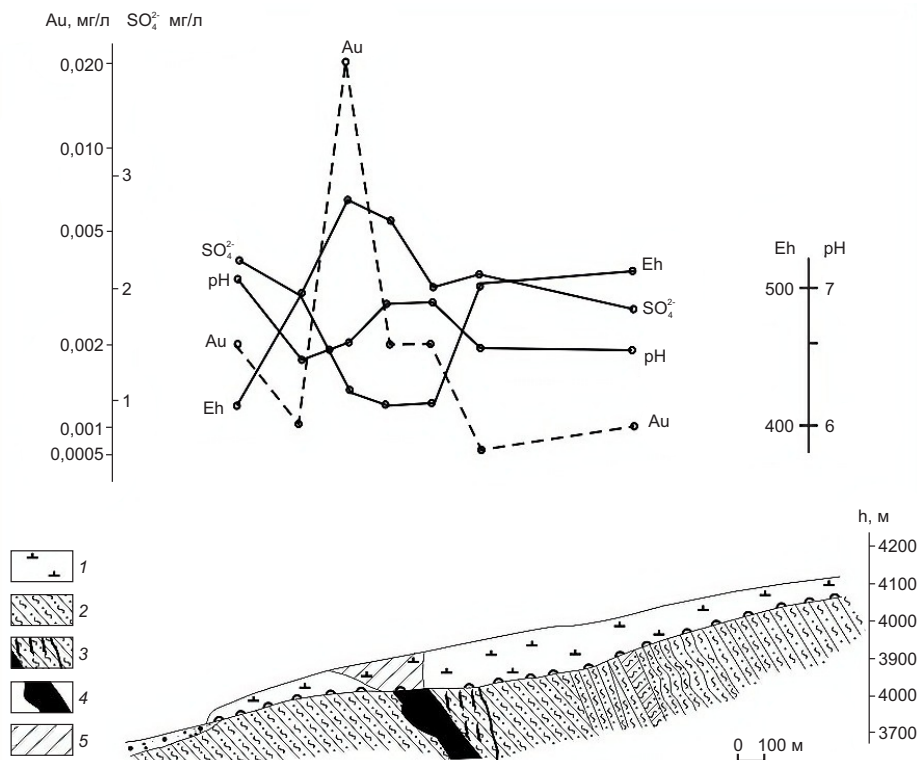


Рис. 6. Аномалии элементов-индикаторов золоторудной минерализации на поверхности ледника Давыдова в эпицентре рудной зоны:

1 – ледник; 2 – песчано-глинистые сланцы; 3 – метаморфизованные сланцы; 4 – рудные метасоматиты; 5 – эндогенные и криогенные геохимические ореолы

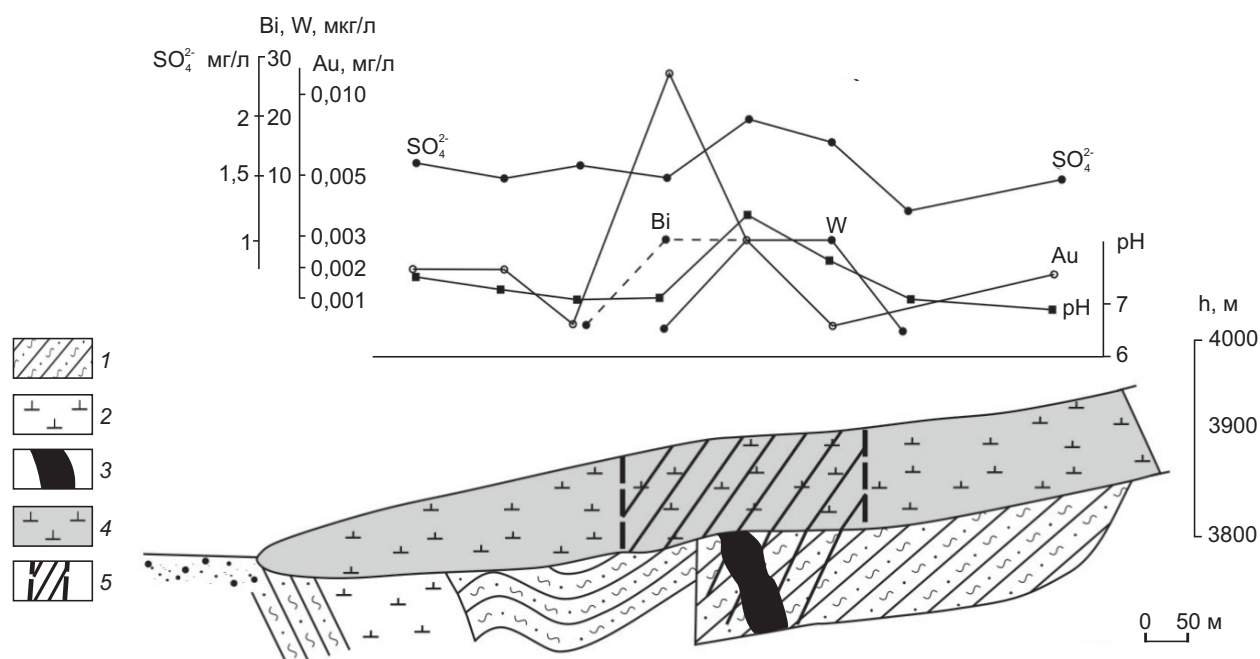
и существовании субширотного тектонического нарушения в центральной части ледника. Действительно, характер рудной зоны к юго-западу от ледника Давыдова существенно меняется, что зафиксировано при вскрытии ледника в ходе дальнейшего геологического изучения месторождения [12].

Ледник Лысый находится в 2,0 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  $-6^\circ$  на поверхности до  $-2,5^\circ\text{C}$  в придонной части.

Ледник на протяжении почти 300 м перекрывает золоторудное тело (см. рис. 6). Подошва ледника в пределах наиболее углублённой части ло-

жа находится на горизонте 4050 м. Установлено, что содержание типоморфных элементов (Au, W, Cu, Zn, Cr, Ag, Sn, V, Mo, Pb) 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 лёд 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. Контрастность аномалий (КК) по отношению к фоновым значениям максимальна для Cu, Zn и W ( $\geq 20$ ) и уменьшается в ряду (в скобках величина КК): Cu (80) – Zn (30) – W (20) – Au, Cr (10) – Ag, Sn (7) – V (5) – Mo, Pb (3).





**Рис. 7. Геохимические аномалии элементов-индикаторов золоторудной минерализации на поверхности ледника Сары-Тор в эпицентре рудной зоны:**

сланцы: 1 – песчано-глинистые, 2 – метаморфизированные; 3 – рудные метасоматиты; 4 – ледник; 5 – эндогенные и криогенные геохимические ореолы

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

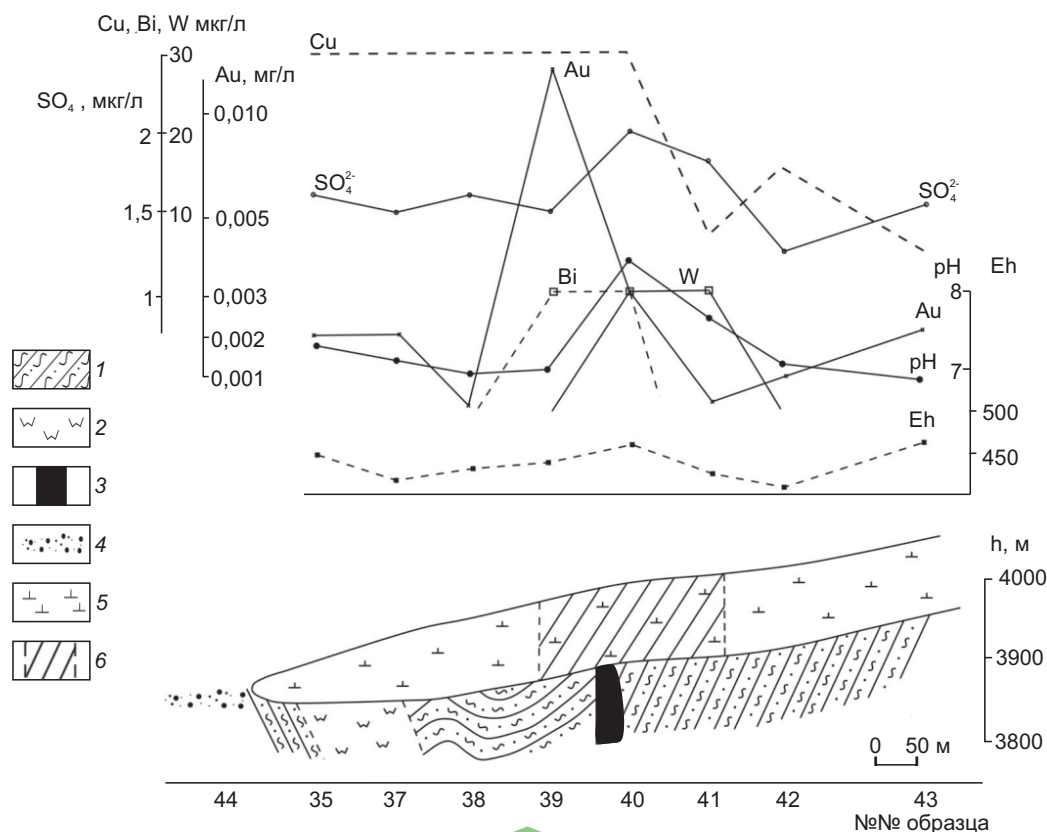
Распределение химических элементов на поверхности ледника неоднородно. Непосредственно в эпицентре рудного тела на поверхности ледника практически без смещения наблюдаются аномалии золота, цинка, меди, вольфрама и хрома. Отрицательные аномалии над месторождением формируют сульфаты и величина окислительно-восстановительного потенциала  $E_h$ . 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. 6) образуют более контрастные аномалии на поверхности ледника над северо-восточной частью рудного тела и совпадают с обогащёнными участками рудного тела.

Таким образом, в толще ледника, перекрывающего рудное тело, формируются наложенные криогенные геохимические ореолы элементов-индикаторов. Состав наложенных ореолов соответ-

ствует 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 его мощностью 50–60 м.

На юго-западном фланге месторождения находится ледник Сары-Тор, длина которого составляет около 5 км, ширина в среднем течении около 1 км, периметр цирка 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 не было известно.

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. 7). Дальнейшими геологоразведочными работами под ледником было вскрыто золоторудное тело, которое расположено в проекции эпицентра геохимической



**Рис. 8. Геохимические аномалии элементов-индикаторов 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

аномалии. Протяжённость аномалии на поверхности ледника от её центра в направлении движения льда составляет 50–100 м, при мощности льда 165 м.

По уменьшению контрастности (относительно фоновых содержаний в ледниках Ак-Шийрака) микроэлементы в КГП ледника Сары-Тор располагаются в следующий ряд: Be, Cu (10) – Zn, Sn (6) – Cr, Pb (5) – Mn, Tl, W (4) – Au, Mo (3) – TR, B (2). Криогенное геохимическое поле ледника Сары-Тор отличается слабой аномалией основных элементов-индикаторов оруденения – W и Au. Концентрация золота в центре аномалии – 0,012 мкг/л, уже на расстоянии 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. 8). Протяжённость аномалии на поверхности ледника от её центра по направлению движения льда достигает 200–250 м, при толще льда мощностью 100 м.

Строение криогенных геохимических полей на ледниках месторождения Кумтор характеризуется качественными (химические элементы и соединения) и количественными (концентрация элементов, протяжённость ореолов) показателями, закономерно распределяющимися в толще льда на поверхности. Состав криогенных геохимических полей (КГП) ледников отражает состав

рудных тел и эндогенных ореолов на месторождении Кумтор (табл. 2).

Вертикальный диапазон криогенных геохимических полей теоретически может достигать сотен метров, установленная мощность их проявления на месторождении Кумтор ограничивается толщиной льда исследованных ледников – до 175 м [2, 13].

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. Над более богатыми участками рудного тела в леднике образуются и более контрастные геохимические аномалии. Вертикальный диапазон миграции элементов-индикаторов и, соответственно, мощность наложенного ореола ограничиваются мощностью льда и колеблются от 50–60 (ледник Лысый) до 165–175 м (ледники Давыдова, Петрова, Сары-Тор).

Этот процесс аналогичен криогенному солевому рассеиванию рудных компонентов в многолетнемёрзлых рыхлых отложениях [13].

Разработанные российскими геохимиками [5, 13 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 многолетнемёрзлых рыхлых отложениях, перекрывающих рудные тела, происходит миграция рудных компонентов в направлении от рудного тела к поверхности земли, обусловленная градиентом концентрации солей в незамерзающих сверхтонких плёнках связанной воды. При 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 [4, 9].

Формирование локальных криогенных геохимических полей рудных тел на ледниках делает возможными поиски месторождений полезных ископаемых, перекрытых мощными толщами ледниковых покровов. Ледниковые системы

Табл. 2. Состав криогенных геохимических полей ледников и эндогенных ореолов на месторождении Кумтор

| Ледник                           | Состав криогенных геохимических полей на поверхности ледника | Протяжённость КГП, м | Мощность ледника, м | Источник КГП         |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 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, Tl, 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          |
| Месторождение Кумтор [7, 12, 13] |                                                              |                      |                     |                      |
| 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          |

Примечание. \* – небольшой висячий ледник в районе ледника Давыдова.



на территории России занимают площадь около 54,5 тыс. км<sup>2</sup>, в пределах которой могут быть обнаружены крупные месторождения полезных ископаемых.

Поиски скрытых под ледниковыми покровами месторождений полезных ископаемых путём изучения КГП предпочтительно проводить на первой стадии при геохимическом картировании в ходе регионального геологического изучения недр и прогнозирования полезных ископаемых и на второй стадии при поисках и оценке месторождений на новых или недостаточно изученных площадях в целях выявления месторождений полезных ископаемых [8]. При прогнозно-ревизионных работах в ледниковых районах возможно применение метода поисков по КГП.

**Заключение.** Проведённые исследования показали, что для решения поставленных задач при поиске рудных месторождений на территориях, закрытых ледниками, перспективно применение геохимических методов.

Геохимические исследования проведены в районе высокогорного золоторудного месторождения Кумтор Срединный Тянь-Шань (Киргизия). Работы были сосредоточены на ледниках холодного и тёплого типа: Петрова, Сары-Тор, Давыдова, Лысый, № 354 и Боорду, перекрывающих минерализованную зону и рудные тела месторожде-

ния. Установлено, что во льдах ледников в эпицентрах рудных тел формируются аномалии криогенных геохимических полей (КГП). Строение КГП на ледниках месторождения Кумтор характеризуется качественными (химические элементы и соединения) и количественными (концентрация элементов, протяжённость 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. Протяжённость 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 возможным поиски месторождений полезных ископаемых, перекрытых мощными толщами ледниковых покровов. Ледниковые системы на территории России занимают площадь около 54,5 тыс. км<sup>2</sup>, в пределах которой могут быть обнаружены крупные месторождения.

Даны рекомендации по использованию КГП при прогнозно-поисковых работах в ледниковых районах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолин Е. Д., Немов А. Е., Попов М. В. Мерзлотно-геотермическая характеристика месторождения Кумтор // Геокриологические исследования в горах. – Якутск : Изд-во института мерзлотоведения СО РАН, 1989. – С. 31–40.
2. Макаров В. Н. Геохимические поиски месторождений перекрытых ледниками // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России : Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Якутск : Издат. дом СВФУ, 2014. – С. 271–276.
3. Макаров В. Н. Геохимические поля в криолитозоне. – Якутск : Изд-во института мерзлотоведения СО РАН, 1998. – 116 с.
4. Макаров В. Н. Естественные электрические поля и электрохимические аномалии на месторождениях полезных ископаемых в криолитозоне / В. С. Якупов // Геофизика криолитозоны. – Якутск : Изд-во ЯГУ, 2008. – С. 228–235.
5. Мельников П. И., Иванов О. П., Макаров В. Н., Питулько В. М., Шварцев С. Л. Явление криогенной миграции химических элементов и его значение для поисков месторождений в районах многолетней мерзлоты // Доклады АН СССР. – 1988. – Т. 303, № 4. – С. 963–967.
6. Никоноров В. В., Караев Ю. В., Борисов Ф. И., Тольский В. И., Замалетдинов Т. С., Ларина Т. В., Горбанева Т. В. Золото Кыргызстана. Книга 2. Описание месторождений. Рудные. – Бишкек : Наси, 2004. – 272 с.
7. Петраков Д. А., Коваленко Н. В., Лаврентьев И. И., Усубалиев Р. А. Толщина, объём и последние изменения ледника Сары-Тор (массив Ак-Шыйрак, Внутренний Тянь-Шань) // Криосфера Земли. – 2014. – Т. XVIII, №3. – С. 91–100.

8. *Положение о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (твердые полезные ископаемые)*. Утверждено распоряжением Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 5 июля 1999 г. N 83-р.
9. *Рысс Ю. С.* Геоэлектрoхимические методы разведки (введение в геоэлектрoхимию). – Л. : Недра, 1983. – 255 с.
10. *Торгоев И. А.* Ледники, золото и геоэкология Кумтора. – Рига : Lambert Academic Publishing, 2017. – 204 с.
11. *Хромова Т. Е., Носенко Г. А., Глазовский А. Ф., Муравьев А. Я., Никитин С. А., Лаврентьев И. И.* Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // Лёд и Снег. – 2021. – Т. 61, № 3. – С. 341–358. – DOI : 10.31857/S2076673421030093.
12. *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. – 2022. – Т. 8, № 3. – С. 79–101.
13. *Катлер Р.* Крупнейшее золоторудное месторождение Кыргызстана теряет свой блеск [Электронный ресурс]. – URL : <https://centrasia.org/newsA.php?st=1342849980#gsc.tab=0> (дата обращения 04.07.2025).
14. *Makarov V. N.* The geochemical phenomenon - local geochemical fields in a glacier // Environmental Research in the Arctic, 2000. Memoirs of National Institute of Polar Research. Special Issue. – Tokyo, Japan., 2001. – № 54. – P. 271–278.
15. *Barrick Provides Update on Pascua-Lama Project* [Электронный ресурс]. – URL : <https://www.barrick.com/news/news-details/2018/Barrick-Provides-Update-on-Pascua-Lama-Project/default.aspx> (access date 04.07.2025)

## REFERENCES

1. *Ermolin E. D., Nemov A. E., Popov M. V.* Merzlotno-geotermicheskaya kharakteristika mestorozhdeniya Kumtor [Permafrost-geothermal characteristics of the Kumtor deposit], Geokriologicheskiye issledovaniya v gorakh, Yakutsk, In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR publ., 1989, pp. 31–40. (In Russ.)
2. *Makarov V. N.* Geokhimicheskiye poiski mestorozhdeniy, perekrytykh lednikami [Geochemical prospecting of deposits covered by glaciers], Geologiya i mineral'no-syr'yevyye resursy Severo-Vostoka Rossii, Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Yakutsk, Izd. dom SVFU publ., 2014, pp. 271–276. (In Russ.)
3. *Makarov V. N.* Geokhimicheskiye polya v kriolitozone [Geochemical fields in the cryolithozone], Yakutsk, Izdatel'stvo Instituta merzlotovedeniya SO RAN publ., 1998, 116 p. (In Russ.)
4. *Makarov V. N.* Yestestvennyye elektricheskiye polya i elektrokhimicheskiye anomalii na mestorozhdeniyakh poleznykh iskopayemykh v kriolitozone [Natural electric fields and electrochemical anomalies at mineral deposits in the cryolithozone], Geofizika kriolitozony, Yakutsk, Izd-vo Yakutskogo universiteta publ., 2008, pp. 228–235. (In Russ.)
5. *Mel'nikov P. I., Ivanov O. P., Makarov V. N., Pitul'ko V. M., Shvartsev S. L.* Yavleniye kriogennoy migratsii khimicheskikh elementov i yego znachenije dlya poiskov mestorozhdeniy v rayonakh mnogoletney merzloty [Phenomenon of cryogenic migration of chemical elements and its significance for prospecting for deposits in permafrost areas], Doklady AN SSSR, 1988, V. 303, No. 4, pp. 963–967. (In Russ.)
6. *Nikonov V. V., Karaev Yu. V., Borisov F. I., Tolsky V. I., Zamaletdinov T. S., Larina T. V., Gorbaneva T. V.* Zoloto Kyrgyzstana. Kniga 2 Opisaniye mestorozhdeniy. Rudnyye [Gold of Kyrgyzstan. Book 2. Description of deposits. Ore], Bishkek, Nasi publ., 2004, 272 p. (In Russ.)
7. *Petrakov D. A., Kovalenko N. V., Lavrent'yev I. I., Usuliyev R. A.* Tolshchina, ob'yom i posledniye izmeneniya lednika Sary-Tor (massiv Ak-Shyyrak, Vnutrenniy Tyan'-Shan') [Thickness, volume and recent changes of the Sary-Tor glacier (Ak-Shyyrak massif, Inner Tien Shan)], Kriosfera Zemli, 2014, V. XVIII, No. 3, pp. 91–100. (In Russ.)
8. *Polozheniye o poryadke provedeniya geologorazvedochnykh rabot po etapam i stadiyam (tverdye poleznyye iskopayemye)*. Utv. rasporyazheniyem MPR RF ot 5 iyulya 1999 g. N 83-r [Regulation on the procedure for conducting geological exploration work in stages and phases (solid minerals). Approved by the order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated July 5, 1999 N 83-r], Moscow, MPR RF publ., 1999. (In Russ.)
9. *Ryss Yu. S.* Geoelektrokhimicheskiye metody razvedki. Vvedeniye v geoelektrokхимию [Geoelectrochemical exploration methods. Introduction to geoelectrochemistry], Leningrad, Nedra publ., 1983, 255 p. (In Russ.)

10. *Torgoyev I. A.* Ledniki, zoloto i geoekologiya Kumtora [Glaciers, gold and geoecology of Kumtor], Riga, Lambert Academic Publishing, 2017, 204 p. (In Russ.)
11. *Khromova T. Ye., Nosenko G. A., Glazovskiy A. F., Murav'yev A. Ya., Nikitin S. A., Lavrent'yev I. I.* Novyy Katalog lednikov Rossii po sputnikovym dannym (2016–2019 gg.) [New Catalog of Russian Glaciers Based on Satellite Data (2016–2019)], *Lod i Sneg*, 2021, V. 61, No. 3, pp. 341–358, DOI: 10.31857/S2076673421030093. (In Russ.)
12. *Shevkunov A. G., Guda A. A., Skorynina A. A., Maknays S. V.* Issledovaniye mineral'nogo sostava rud mestorozhdeniya Kumtor (Sredinnyy Tyan'-Shan') metodami QXRD i XRF [Study of the mineral composition of ores of the Kumtor deposit (Middle Tien Shan) by QXRD and XRF methods], *Mineralogiya*, V. 8, No. 3, 2022, pp. 79–101. (In Russ.)
13. *Katler R.* Krupneysheye zolotorudnoye mestorozhdeniye Kyrgyzstana teryayet svoy blesk [Kyrgyzstan's Largest Gold Deposit Loses Its Shine], available at: <https://centrasia.org/newsA.php?st=1342849980#gsc.tab=0> (04.07.2025) (In Russ.)
14. *Makarov V. N.* 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, pp. 271–278.
15. *Barrick* Provides Update on Pascua-Lama Project, available at: <https://www.barrick.com/news/news-details/2018/Barrick-Provides-Update-on-Pascua-Lama-Project/default.aspx> (access date 04.07.2025)

Статья поступила в редакцию 29.01.25; одобрена после рецензирования 20.06.25; принята к публикации 20.06.25.  
The article was submitted 29.01.25; approved after reviewing 20.06.25; accepted for publication 20.06.25.