

Н. В. ШАТОВА, В. В. ШАТОВ, А. В. МОЛЧАНОВ, О. В. ПЕТРОВ,
А. В. ТЕРЕХОВ, В. Н. БЕЛОВА, В. И. ЛЕОНТЬЕВ (ВСЕГЕИ)

Геохимия и петрография гидротермально измененных пород Рябинового рудного поля (Южная Якутия) как основа прогноза золото-медно-порфирового оруденения

Обсуждаются результаты прогнозной оценки территории Рябинового рудного поля на золото-медно-порфировое оруденение на основе комплексного подхода к изучению петрографических и геохимических особенностей гидротермально измененных пород. Картирование полей слабопроявленных гидротермально-метасоматических образований и околорудных метасоматитов показало, что процесс внедрения Рябинового сиенитового массива сопровождался формированием гидротермально-метасоматической зональности плутоногенного типа, представленной во внутренних частях массива ореолами эгириновых фельдшпатитов и гумбеитов, а в околоинтрузивном пространстве – приконтактными ореолами скарнирования, фенитизации и пропилитизации. Установлены основные петрогеохимические особенности (специализация) околорудных метасоматитов и площадных гидротермально-метасоматических изменений. Показано, что ореолы гумбеитизации в совокупности с положительными аномалиями AuAgCuBi, BaMoPb и AsSbHg составов могут быть использованы в качестве основных критериев прогнозирования золото-медно-порфировой рудной минерализации на территории Рябинового рудного поля. Предлагаются рекомендации по проведению дальнейших поисково-оценочных работ в пределах локализованных перспективных участков.

Ключевые слова: геохимия и петрография гидротермально измененных пород, прогноз золото-медно-порфирового оруденения, Рябиновое рудное поле, Южная Якутия.

N. V. SHATOVA, V. V. SHATOV, A. V. MOLCHANOV, O. V. PETROV,
A. V. TEREKHOV, V. N. BELOVA, V. I. LEONT'EV (VSEGEI)

Geochemistry and petrography of hydrothermally altered rocks of the Ryabinovoe ore field (South Yakutia) as the basis for prediction of gold-copper-porphyry ore mineralization

Results of predictive assessment of gold-copper-porphyry mineralization based on combine approach to studying and mapping petrographic and geochemical characteristics of hydrothermally altered rocks within the Ryabinovoe ore field are discussed. It was established that emplacement and subsequent evolution of the Rybinovy alkaline stock were accompanied by the formation of hydrothermal-metasomatic zonation of plutogenic type. The zonation is represented by haloes of aegirine feldspathitic and gumbeyitic alteration within inner parts of the stock and by haloes of skarnification, fenitic and propylitic alteration in near-intrusion space. Main petrochemical and geochemical characteristics (specialization) of both wallrock metasomate and weakly/moderately hydrothermally altered rock are recognized. It was indicated that gumbeyitic alteration haloes in combination with positive multiplicative geochemical anomalies of AuAgCuBi, BaMoPb and AsSbHg composition could be used as main criteria for the prediction of gold-copper-porphyry ore mineralization within the Ryabinovoe ore field. The article provides recommendations on geological exploration within the located prospects.

Keywords: geochemistry and petrography of hydrothermally altered rocks, prediction of gold-copper-porphyry ore mineralization, the Ryabinovoe ore field, South Yakutia.

Для цитирования: Шатова Н. В. Геохимия и петрография гидротермально измененных пород Рябинового рудного поля (Южная Якутия) как основа прогноза золото-медно-порфирового оруденения / Н. В. Шатова, В. В. Шатов, А. В. Молчанов, О. В. Петров, А. В. Терехов, В. Н. Белова, В. И. Леонтьев // Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 84. – С. 71–96.

Введение. Наряду с такими традиционными методами, как литогеохимия по вторичным и первичным ореолам рассеяния, магниторазведка, гравиразведка, электроразведка, гиперспектральная съемка и т. д., повышения надежности опознания потенциально рудоносных территорий на стадии проведения крупномасштабных

геологосъемочных и поисково-оценочных работ можно ожидать также и от широкого привлечения методов, основанных на изучении гидротермально измененных пород и околорудных метасоматитов.

В нашей стране проблемой использования гидротермально-метасоматических образований

(ГМ-образований) для целей локального прогноза и оценки перспектив рудоносности территорий в разные годы занимались такие известные ученые, как Д. С. Коржинский, В. А. Жариков, Д. В. Рундквист, Л. Н. Овчинников, Б. И. Омеляненко, В. Л. Русинов, Г. П. Зарайский, В. Г. Чековаидзе, С. Д. Шер, П. Ф. Иванкин, С. И. Набоко, Г. Л. Поспелов, Д. И. Царёв, Л. И. Шабынин, Ю. Н. Размахнин, И. П. Щербань, Г. Н. Щерба, В. Д. Боголепов, А. Е. Шлыгин, В. Н. Сазонов, О. Н. Грязнов, Г. П. Дворник, Н. И. Наконник, Н. И. Курек, А. И. Курек, Ю. В. Казыцын, И. Г. Павлова, В. В. Жданов, Э. А. Ланда, М. М. Василевский, Г. Т. Волостных, Е. В. Плющев, О. П. Ушаков, Г. М. Беляев, В. В. Шатов, А. В. Молчанов, С. В. Кашин и многие другие, внесшие своими исследованиями существенный вклад в формирование и развитие российской научной школы по изучению процессов метасоматизма и рудообразования.

Во ВСЕГЕИ в середине 1970-х годов была разработана и успешно применена на практике оригинальная методика проведения поисково-оценочных работ масштаба 1 : 50 000 (1 : 25 000 и крупнее) на основе картирования полей гидротермально измененных пород и комплексного изучения их минералого-петрографических и геохимических особенностей [19–21]. С 1974 по 2019 г. эта методика прошла апробацию в пределах многих рудных районов как Российской Федерации, так и стран ближнего и дальнего зарубежья

(Казахстан, Узбекистан, Кыргызстан, Таджикистан, Болгария, Турция, Судан, Нигер, Монголия и др.). С ее помощью во ВСЕГЕИ накоплен богатейший опыт прогнозирования скрытого гидротермального оруденения различных геолого-промышленных типов — золото-уранового, молибден-уранового, медно-колчеданного, колчеданно-золото-полиметаллического, скарнового золото-полиметаллического, стратиформного барит-полиметаллического, грейзенового редкометалльного, жильного золото-кварцевого малосульфидного, золото-сульфидного, эпитеермального золото-серебряного, золото-медно-молибден-порфирового и др.

Главная цель настоящей статьи — продемонстрировать на примере Рябинового рудного поля (Южная Якутия) особенности применения данной методики и ее эффективность при прогнозировании скрытой с поверхности рудной минерализации, принадлежащей золото-медно-порфировому геолого-промышленному типу.

Рябиновое рудное поле. Расположено в Центрально-Алданском рудном районе Южной Якутии (рис. 1). В его геологическом строении преобладают мезозойские щелочные магматические породы. К северо-восточной эндоконтактовой части Рябинового сиенитового массива приурочено одноименное золото-медно-порфировое месторождение, рудные тела которого отличаются прожилково-вкрапленным характером

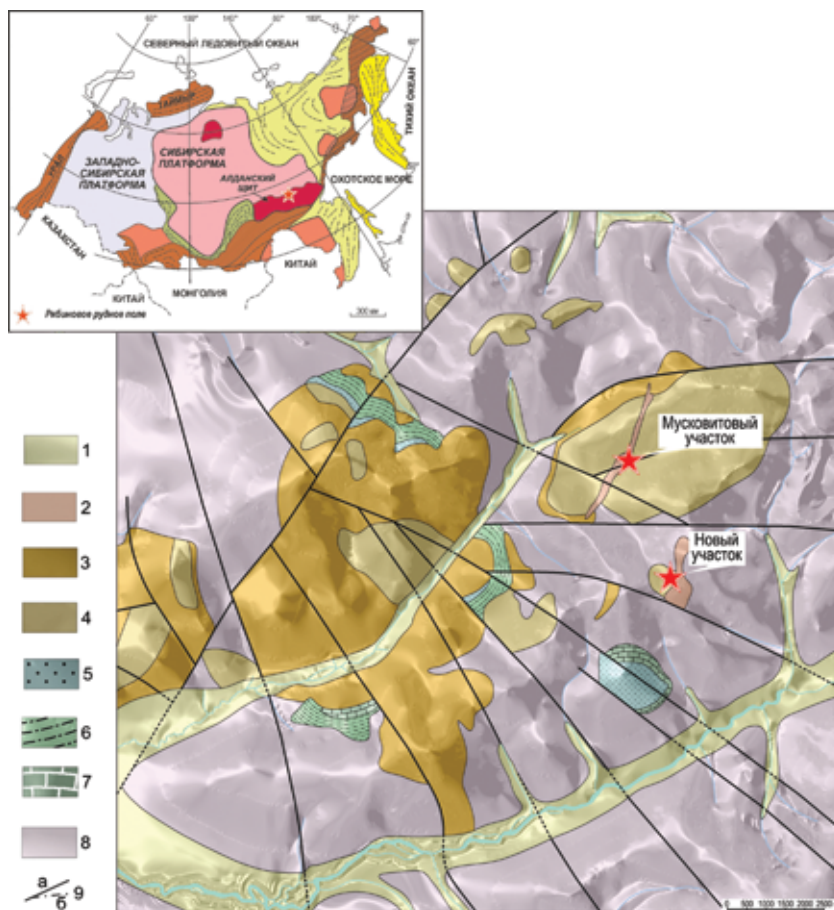


Рис. 1. Схема геологического строения Рябинового рудного поля, совмещенная с моделью рельефа местности

1 — четвертичные аллювиальные отложения; 2 — габбро-монзониты, монцодиориты, меланократовые сиениты, щелочные флогопит-пироксеновые лампрофиты и эруптивные брекчии с лампроитовым цементом (*тобукский комплекс* — K_1); 3, 4 — алданский комплекс — J_3-K_1 (3 — порфировидные щелочнополевошпатовые эгирин-авгитовые сиениты I фазы, 4 — щелочнополевошпатовые эгирин-авгитовые сиениты, сиенит-порфиры и нордмаркиты II фазы); 5 — песчаники полимиктовые с прослоями и линзами гравелитов, конгломератов и алевролитов (*юхтинская свита* — J_1); 6, 7 — *юдомская серия* — V_2-E_1 (6 — субаркозовые песчаники, песчаные доломиты, алевролиты, гравелиты, конгломераты, 7 — доломиты, глинистые доломиты); 8 — *протерозойский метаморфический комплекс* — PR_1 (амфиболовые, биотитовые и биотит-гранатовые гранитоиднейсы, гнейсовидные граниты, кристаллические сланцы); 9 — тектонические нарушения (а — главные, б — второстепенные)

проявления золоторудной минерализации, локализованной в пределах двух рудоносных участков – Мусковитового и Нового.

Рябиновый массив, прорывающий гнейсы и гранитогнейсы докембрия, карбонатные, терригенно-карбонатные и терригенные отложения венда и юры, представляет собой интрузивное тело размером 8×5 км, контролируемое зоной пересечения двух крупных региональных разломов: Якутского меридионального и Юхтинского северо-западного.

На современном уровне эрозионного среза массив обладает формой неправильного эллипсоида, длинная ось которого ориентирована на северо-восток. Кольцевое строение массива подчеркивается характером распространения в его пределах многочисленных дайковых тел и останцев кровли вмещающих пород, представленных доломитами и терригенными отложениями венда и юры.

В строении Рябинового массива выделяются три блока, которые, по геофизическим данным, на глубине 150–200 м от поверхности объединяются в единое интрузивное тело. По данным А. Н. Угрюмова и Г. П. Дворника [24], массив имеет форму лополита с падением контактов к его центру.

При сравнительно незначительных размерах Рябиновый массив обладает большим разнообразием plutonic и гипабиссальных пород, а также брекчиевых, гидротермально-метасоматических и рудных образований.

В результате ранее проведенных авторами статьи геологических, минералого-петрографических и изотопно-геохронологических исследований были осуществлены вещественная (классификационная) идентификация и изотопное (U-Pb и Rb-Sr) датирование щелочных магматических пород Рябинового рудного поля и доказано, что большая часть объема пород, участвующих в строении Рябинового массива, принадлежит высококалийным сиенитам, сиенит-порфирам и кварцевым сиенитам алданского plutonic комплекса и сменяющим их во времени щелочным лампрофирам и эруптивным брекчиям с лампроитовым цементом тобукского гипабиссального комплекса [17; 23; 25–27].

Внутренние более эродированные участки Рябинового массива сложены щелочнополевошпатовыми эгирин-авгитовыми сиенитами I фазы внедрения алданского комплекса, тогда как щелочнополевошпатовые эгирин-авгитовые сиениты, нордмаркиты и сиенит-порфиры II фазы внедрения этого комплекса обнажаются в наименее эродированной северо-восточной части массива в пределах Мусковитового и Нового рудоносных участков Рябинового месторождения, где широкое распространение получили также и гипабиссальные магматические породы тобукского комплекса.

На основе использования U-Pb и Rb-Sr изотопных систем по акцессорным цирконам, апатитам, а также пороодообразующим минералам

(калиевому полевому шпату, эгирин-авгиту и биотиту) был получен раннемеловой возраст магматической кристаллизации пород вышеупомянутых магматических комплексов, находящийся в интервале 142–145 млн лет – для сиенитов алданского и 130–141 млн лет – пород тобукского комплексов [26; 27].

Оруденение Рябинового месторождения относится к золото-медно-порфировому семейству и парагенетически связано с процессом внедрения и длительного становления одноименного сиенитового массива. Как было показано выше (см. рис. 1), оно локализуется в двух рудоносных участках – Мусковитовом и Новом – среди тектонически нарушенных и гидротермально измененных сиенитов алданского комплекса на контакте с прорывающими их малыми телами меланократовых пород и эруптивных брекчий тобукского гипабиссального комплекса. Основной рудный минерал в рудах месторождения – пирит, второстепенные минералы представлены халькопиритом, сфалеритом, галенитом, молибденитом и арсенопиритом. Рудные тела образуют штокверки и минерализованные зоны с содержаниями золота, варьирующими в интервале от 1 до 4 г/т. Попутными полезными компонентами являются серебро, медь, молибден и свинец [27].

Методика исследований. В соответствии с требованиями к методике проведения крупномасштабного картирования гидротермально-метасоматических образований, основная задача полевых работ заключалась в прохождении маршрутов протяженностью 2–5 км, ориентированных с учетом фактической обнаженности района работ вкрест простирания основных геологических структур, интрузивных контактов, зон гидротермально измененных пород с созданием относительно равномерной сети опорных пунктов наблюдения по всей изучаемой территории района (рис. 2). Главная задача маршрутов – проведение геологических наблюдений и петрографо-геохимическое опробование коренных пород, участвующих в строении Рябинового рудного поля. В каждом фиксированном пункте наблюдения осуществлялся отбор образцов из наиболее характерных и в различной степени измененных пород, сколков для изготовления прозрачно-полированных шлифов и штучных геохимических проб весом 250–500 г. Работы велись на существующей геологической основе м-ба 1 : 50 000 с привязкой по топокартам и GPS. Всего в ходе полевых работ на площади Рябинового рудного поля размером 67 км² было отобрано 404 образца из наиболее представительных разностей щелочных магматических пород одноименного массива и вмещающих его гранитогнейсов и кристаллических сланцев докембрийского возраста, а также терригенно-карбонатных пород плитного комплекса и разнофациальных метасоматитов.

Минералого-петрографическое и петрогеохимическое изучение потенциально рудоносных

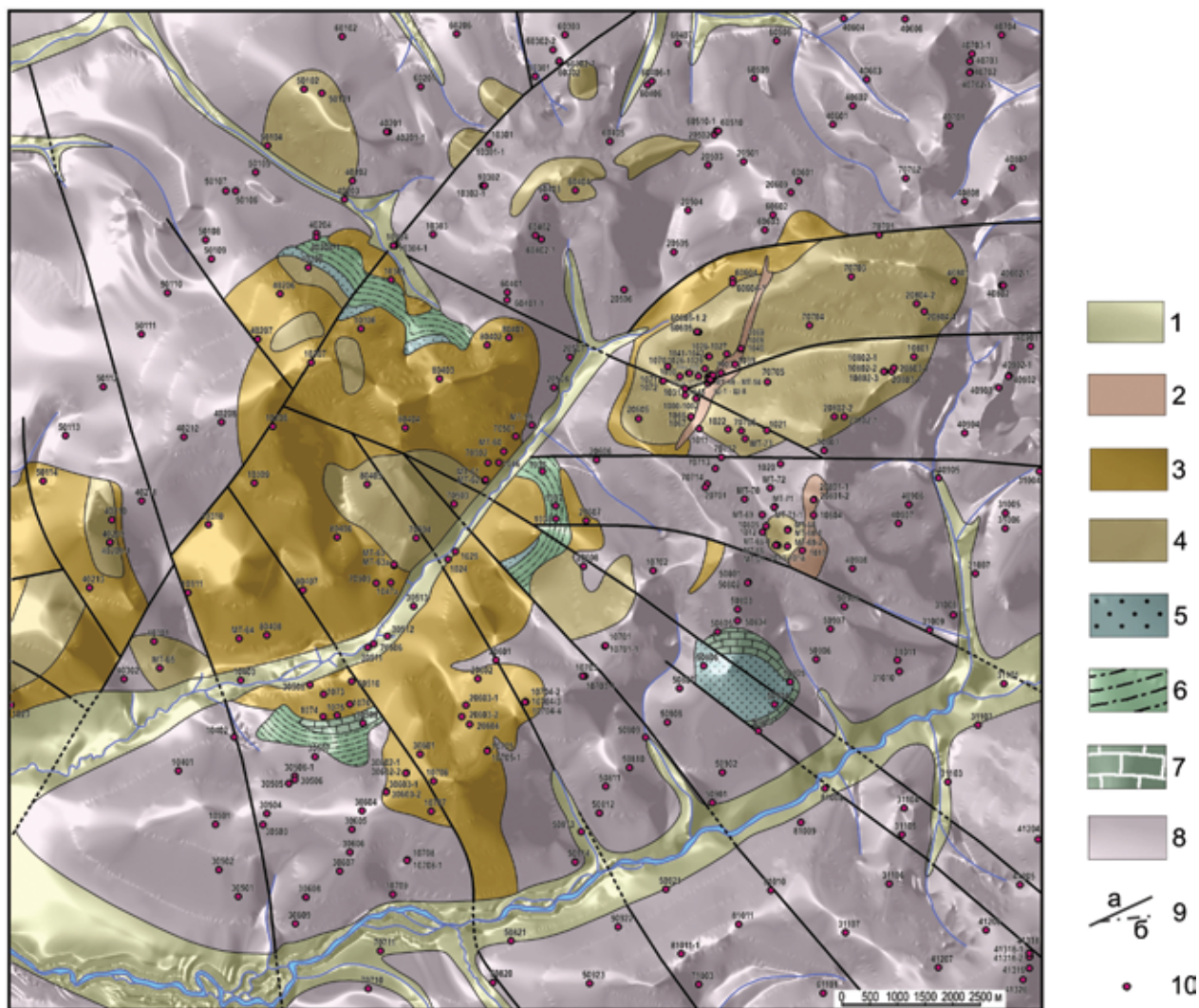


Рис. 2. Схема петрографо-геохимического опробования коренных пород Рябинового рудного поля, совмещенная с моделью рельефа местности

1–9 – см. усл. обозн. к рис. 1; 10 – пункты петрографо-геохимического опробования

участков и зон гидротермальных изменений осуществлялось путем детального опробования коренных пород вдоль наиболее представительных сечений этих зон горными выработками (канавами) или стенками карьера. Для расчета баланса движения вещества в процессах гидротермального метасоматизма проводился дополнительный отбор штучных проб весом 500–800 г, характеризующих участки пород с умеренной (5–15 % новообразований), сильной-интенсивной (15–50 %) и полной (> 70–80 %) степенями проявления гидротермально-метасоматических образований одного вида.

Изучение гидротермально-метасоматических образований строилось на основе тщательного микроскопического анализа эпигенетической минерализации во всех 404 прозрачно-полированных шлифах [19; 21; 32–34].

В основу петрогеохимических построений были положены результаты химических анализов (404 образца), выполненные в центральной лаборатории (ЦЛ) ВСЕГЕИ методами:

- индуктивно-связанной плазмы (ICP-MS) на U, Th, Ta, Nb, Zr, Hf, Rb, Sr, Li, Be, Sn, W, Mo, As, Sb, Ag, Bi, Pb, Zn, Cu, Sc, Ni, Co, Y и REE; атомной абсорбции (метод вскрытия царской водкой) – Au; холодного пара – Hg; инфракрасной спектроскопии – CO₂ и S;

- рентгено-спектральным флуоресцентным (XRF) на петрогенные оксиды, а также V, Cr и Ba.

Определение объемного веса горных пород, руд и метасоматитов было выполнено в 94 образцах и так же в ЦЛ ВСЕГЕИ по стандартной методике с целью расчета баланса вещества при формировании околорудных метасоматитов.

Все вышеперечисленные материалы легли в основу проведения камеральных минералого-петрографических, петрохимических и геохимических работ, в ходе выполнения которых были установлены основные закономерности в строении гидротермально-метасоматической и геохимической (по данным опробования коренных пород) зональностей Рябинового рудного поля.

Гидротермально-метасоматическая зональность. Исследованием петрографических и петрохимических особенностей гидротермально-метасоматических образований в пределах Рябинового рудного поля в разные годы занималась большая группа геологов. Тем не менее наибольший вклад в изучение гидротермально измененных пород и околорудных метасоматитов Рябинового месторождения внесли А. Н. Угрюмов и Г. П. Дворник [24], А. Я. Кочетков с соавторами [11–14], В. Г. Ветлужских с соавторами [1] и Г. П. Дворник [3–5].

Этими исследователями было доказано, что в пределах Мусковитового и Нового участков Рябинового месторождения отмечен широкий спектр разнофациальных и разностадийных гидротермально-метасоматических образований, сформированных в различных термодинамических обстановках и физико-химических условиях проявления гидротермальной деятельности, обусловленной процессом внедрения и длительного становления Рябинового сиенитового массива. Среди них: фениты, эндо- и экзоскарны, околоскарновые породы, эгирин-щелочнополевошпатовые и мусковит-серицит-микроклиновые метасоматиты, микроклиниты и серицитолиты. При этом было отмечено, что только три последние из перечисленных выше разновидностей гидротермалитов являются рудоконтролирующими. Однако проведенные этими авторами исследования метасоматитов были сосредоточены исключительно в пределах Мусковитового и Нового рудоносных участков Рябинового месторождения, то есть сконцентрированы в околорудном пространстве месторождения, и практически не захватывали остальные преобладающие по площади и, как правило, безрудные блоки пород Рябинового массива, а также вмещающие породы из области его контактового воздействия.

Использованная авторами статьи специальная методика крупномасштабного картирования гидротермально-метасоматических образований в наиболее полном объеме их проявления, то есть с учетом внешних зон слабых изменений [19–21], позволила составить карту гидротермально-метасоматической зональности рудного поля в м-бе 1 : 50 000 (рис. 3).

Всего в ходе петрографических исследований гидротермально измененных пород в качестве эпигенетических установлено более 29 минералов (табл. 1), из которых самыми распространенными оказались (в порядке убывания): кварц, калиевый полевой шпат (ортоклаз, микроклин, адуляр), альбит, серицит, карбонат (анкерит, кальцит), эгирин (эгирин-авгит), хлорит, мусковит, амфибол (тремолит, актинолит), гидросерицит, эпидот (цоизит), биотит (флогопит), барит; а из рудных минералов – пирит, гематит, гетит, халькопирит, борнит, ковеллин, ярозит, малахит, азурит и др.

Отмеченные минералы проявлены в коренных породах района в самых различных сочетаниях друг с другом, образуя устойчивые в структурно-вещественном отношении ассоциации

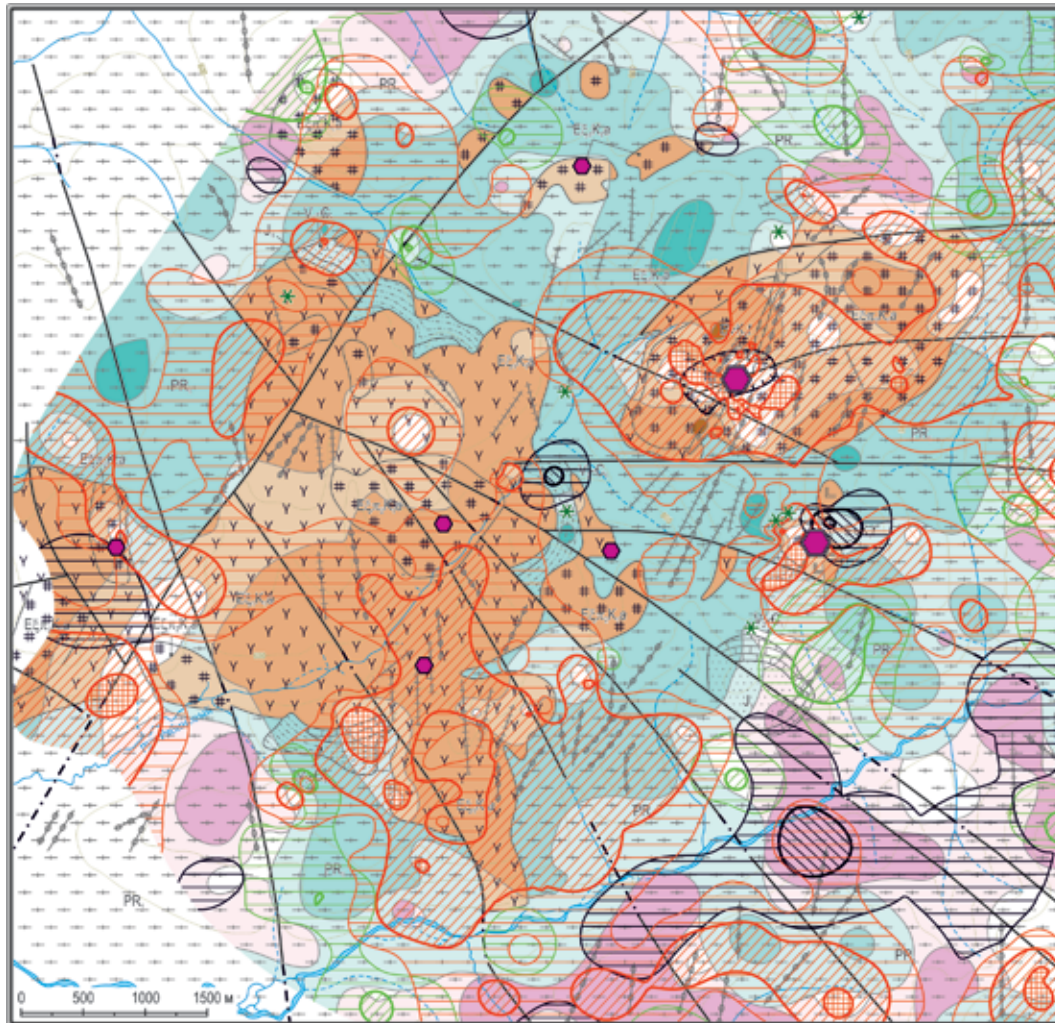
(парагенезисы). Анализ полученных материалов показал, что на территории Рябинового рудного поля зафиксирована целая группа разнофациальных и разновозрастных гидротермально-метасоматических образований, часть из которых была обусловлена процессом внедрения и длительного становления самого Рябинового сиенитового массива, а другая – сформирована на «досиенитовом» тектоногенно-метаморфогенном этапе развития. Всего в процессе петрографических работ зарегистрировано и детально описано семь таких ассоциаций эпигенетических минералов (табл. 2): А1 – гумбеитов, А2 – пропицитов, А3 – скарнов, скарноидов и околоскарновых гидротермалитов, А4 – фенитов, А5 – эгиринсодержащих фельдшпатитов, А6 – березитов и А7 – фельдшпатолитов.

При выделении вышеперечисленных ассоциаций была использована структурно-вещественная классификация гидротермалитов, приведенная в работах Е. В. Плющева с соавторами [19–21]. В соответствии с принятой классификацией гидротермалитов по типу метасоматоза [6; 28], гумбеиты – продукты щелочного углекислого калиевого ($K + CO_2$), скарны и пропициты – субщелочного ($CaFeMg$), фениты – щелочного ($K + FeCaMg$), эгиринсодержащие фельдшпатиты – щелочного ($KNa + Fe$), березиты – кислотного + субщелочного ($Si + CaMgFe$) и фельдшпатолиты – кремнщелочного ($Si + KNa$) метасоматоза.

По структурно-вещественным характеристикам и термодинамическим параметрам из выделенных семи ассоциаций две последние – А6 и А7 – телетермальные тектоногенно-метаморфогенные образования, обусловленные проявлением на территории района приразломной амагматической гидротермальной деятельности. Остальные пять ассоциаций (А1, А2, А3, А4, А5) являются типичными плутоногенными мезотермальными образованиями и были обусловлены процессом внедрения и длительного становления Рябинового массива.

Минералого-петрографическое изучение и картирование ореолов гидротермально измененных пород позволило установить, что процесс внедрения и длительного становления Рябинового сиенитового массива сопровождался формированием гидротермально-метасоматической зональности плутоногенного типа (рис. 3 и 4).

В околоинтрузивном пространстве массива получили широкое распространение приконтактные ореолы *скарнирования*, *фенитизации* и *щелочноамфиболовой пропицитизации*, в размещении которых наблюдаются отчетливые признаки концентрически-зонального строения, унаследованного во многом от эллипсоидной формы самого Рябинового массива (рис. 5). *Скарны* образуют, как правило, локальные метасоматические тела на контакте с сиенитами. Тогда как ореолы *фенитизации* и *пропицитизации* уходят во все стороны от контакта с интрузивом на достаточно большое расстояние в 3–4 км и более,



Тип ГМ-изменения (индекс)		Интенсивность проявления ГМ-изменения		
		Слабая-умеренная < 15 %	Сильная-интенсивная 15-50 %	Интенсивная-полная > 50 %
ГМ-изменения, связанные с Рябиновым сиенитовым массивом	A1	Гумбеиты	[Pattern: horizontal lines]	[Pattern: grid]
	A2	Пропилиты	[Pattern: diagonal lines]	[Pattern: grid]
	A3	Скарны	[Pattern: asterisk]	[Pattern: asterisk]
	A4	Фениты	[Pattern: horizontal lines]	[Pattern: horizontal lines]
	A5	Фельдшпатиты	[Pattern: horizontal lines]	[Pattern: horizontal lines]
Дриенитовые ГМ-изменения	A6	Березиты	[Pattern: diagonal lines]	[Pattern: grid]
	A7	Фельдшпатолиты	[Pattern: diagonal lines]	[Pattern: horizontal lines]

Рис. 3. Гидротермально-метасоматическая зональность территории Рябиновского рудного поля (по данным микроскопического анализа гидротермально-метасоматических образований в прозрачно-полированных шлифах)

образуя во вмещающих интрузив породах зонально построенное поле, геометрия которого во многом определяется морфологией обнаженной части Рябинового массива. При этом ореол *пропилитизации* формирует самую внешнюю, наиболее удаленную от контакта с интрузивом зону изменений, как бы объединяющую в единое целое всю совокупность гидротермально-метасоматических образований, обусловленных процессом внедрения Рябинового сиенитового массива.

Во внутренних частях массива гидротермально-метасоматическая зональность представлена

ореолами эгирин-полевошпатовых метасоматитов – фельдшпатитов и сменяющих их во времени средне-низкотемпературных околорудных гумбеитов или карбонат-серицит-мусковит-калишпатовых гидротермалитов.

Эгириновые фельдшпатиты, или производные высокотемпературного щелочного калий-натриевого метасоматоза, – это типичные аутометасоматические объемные гидротермально-метасоматические образования, проявленные в породах Рябинового массива в виде разнообразных по морфологии крупно- и мегакристаллических

Распространенность вторичных минералов в гидротермально измененных породах Рябинового рудного поля

Минерал	Индекс	Гидротермально-метасоматические образования						Сумма
		связанные со становлением Рябинового массива				«досиенитовые»		
		Гумбеиты	Пропилиты	Скарны	Фельдшпатиты и фениты	Березиты	Фельдшпатолиты	
Кварц	Qtz	149	31	2	112	34	45	373
Ортоклаз (адуляр)	Kfs	150	—	—	160	—	52	362
Альбит	Ab	36	6	5	180	—	34	261
Серицит	Ser	109	38	—	61	37	13	258
Пирит	Pу	79	31	1	66	11	11	199
Анкерит (кальцит)	Ank	115	19	5	41	15	—	195
Эгирин (эгирин-авгит)	Aeg	—	9	3	161	—	—	173
Гематит	Hm	109	—	—	—	21	—	130
Хлорит	Chl	17	33	—	12	19	1	82
Мусковит	Ms	65	—	—	—	—	—	65
Амфибол (актинолит)	Amf	—	9	6	46	—	4	65
Гидросерицит	Hser	37	—	—	—	27	—	64
Плагиоклаз	Pl	—	—	4	38	—	12	54
Лейкоксен	Sph	—	15	3	32	3	1	54
Эпидот (клиноцоизит)	Ep	—	36	1	—	9	—	46
Биотит (флогопит)	Bt	13	24	—	—	5	—	42
Рутил	Rut	25	—	—	8	—	2	35
Рибекит	Rib	—	23	—	—	—	—	23
Ярозит	Jar	23	—	—	—	—	—	23
Апатит	Ap	7	6	1	9	—	—	23
Барит	Bar	15	2	—	—	—	—	17
Флюорит	Fl	9	—	—	4	—	1	14
Гранат	Grt	—	—	1	8	—	—	9
Клинопироксен	Cpx	—	—	6	—	—	—	6
Пренит	Prh	—	—	—	—	5	—	5
Скаполит	Scap	—	—	2	—	—	—	2
Титанит (сфен)	Tit	—	—	—	2	—	—	2
Тальк	Talc	2	—	—	—	—	—	2
Серпентин	Serp	2	—	—	—	—	—	2

пегматитоподобных агрегатов замещения и перекристаллизации: жил, гнезд и прожилков нередко с параллельно-шестоватым (друзитовым) и радиально-лучистым внутренним строением (рис. 6). В геологической литературе подобные гидротермалиты нередко называют вторичными сиенитами, или вторичными кварцевыми сиенитами, так как они обычно сохраняют внешний — магматогенный облик замещаемых интрузивных пород [8; 15].

Гумбеиты, или производные средне-низкотемпературного щелочного углекисло-калиевого метасоматоза, впервые были выделены Д. С. Коржинским [10] на примере Гумбейского золото-шеелитового месторождения на Урале. Их термодинамические и физико-химические параметры образования подробно изучены

И. П. Щербанем [28], а также В. А. Жариковым и соавторами [6]. В пределах Рябинового рудного поля термин «гумбеит» впервые был применен группой геологов ВСЕГЕИ для характеристики околорудных метасоматитов карбонат-серицит-мусковит-калишпатового состава [23; 25–27], которые по минералого-петрографическим особенностям соответствуют «мусковит-серицит-микроклиновым, микроклин-серицитовым и кварц-адуляровым метасоматитам», выделенным и ранее описанным в работах А. Я. Кочеткова с соавторами [14], В. Г. Ветлужских с соавторами [1] и Г. П. Дворника [5]. При этом авторами настоящей статьи [27] было показано, что гумбеиты являются наиболее приближенными во времени к процессу рудообразования, и поэтому их ореолы контролируют размещение основного

Состав, генетический тип и распространенность ГМ-ассоциаций и их фаций в гидротермально измененных породах Рябинового рудного поля

Генетический тип	Стадия формирования	ГМ-ассоциации (ГМ-изменения)	ГМ-фации		Распространенность		Площадь, занятая зонами ГМ-изменений, км ²
			Индекс	Состав	ГМ-фаций	ГМ-ассоциаций	
ПЛУТОНОГЕННЫЙ ГМ-изменения, связанные с внедрением и длительным становлением Рябинового сиенитового массива	Регрессивная	Гумбеиты	G1	kfs (orth) + ser (ms) + ank +/- qtz, chl, bar, py, cpy	157	195	32,5 (48 %)
			G2	kfs (ad) + ank + bar +/- qtz, py, cpy	38		
		Пропилиты	P1	ep + chl + cc + qtz +/- ab, ser	13	46	
			P2	act + ep + chl + cc + qtz +/- ab, ser, trm, talc	9		
			P3	rib + ep + bt +/- cc, ser, chl	24		
	Прогрессивная	Скарны	S1	cpx + act + qtz	6	9	0,7 (1 %)
			S2	grt + cpx + scap +/- phl, aeg	3		
		Фениты	F4	aeg + kfs + bt (phl) +/- qtz, grt, hm, tit	–	68	
	Фельдшпатиты	F3	kfs (ab) + bt (phl) + aeg +/- grt, mi, qtz, hm	–	157	16,4 (23 %)	
	ТЕКТОНОГЕННО-МЕТАМОРФОГЕННЫЙ Досяенитовые ГМ-изменения	Регрессивная	Березиты	B1	qtz + ser (ms) +/- hm, cc	8	41
B2				qtz + chl + ank (cc) + ser, bt	22		
B3				chl + qtz + ank (cc) + ep, prh	11		
Прогрессивная		Фельдшпатолиты	F1	qtz + ab (kfs) +/- fl	8	60	
			F2	qtz + kfs (ab) +/- fl	52		18,3 (27 %)

Примечание. Распространенность приводится в виде количества случаев фиксации той или иной ГМ-ассоциации или ГМ-фации при микроскопическом изучении всех 404 прозрачно-полированных шлифов. В правой колонке – в скобках даны значения площадных параметров зон ГМ-изменений в процентах относительно общей площади рудного поля – 67,2 км².

объема прожилково-вкрапленной золото-сульфидной рудной минерализации в пределах Мусковитового и Нового участков Рябинового месторождения.

Околорудные гумбеитовые изменения проявлены в породах, как правило, в виде тонких – мощностью от 2–3 до 10–15 мм – прожилков кварц-калишпат-серицит-анкеритового состава, а также пятнистых кварц-калишпат-анкерит-серицит-мусковитовых агрегатов, пронизывающих весь объем ранее фельдшпатизированных сиенитов алданского комплекса (рис. 6). Среди гумбеитов выделяются две фациальные разновидности – карбонат-серицит-мусковит-ортоклазовая (фация G1), получившая развитие преимущественно среди сиенитов Рябинового массива в интервале гипсометрических отметок от 550 до 750 м, и кварц-карбонат-барит-адуляровая (фация G2), акцентированно проявленная в породах рудного поля на гипсометрических отметках от 750 до 1100 м и выше.

Таким образом, выявленный на современном уровне эрозионного среза латеральный ряд гидротермалитов – отражение вертикальной метасоматической зональности, проявившейся на территории Рябинового рудного поля.

Как показано на рис. 7, процесс формирования плутоногенной гидротермально-метасоматической

зональности Рябинового рудного поля, связанной с процессом внедрения и длительного становления одноименного массива, может быть рассмотрен путем выделения двух гидротермально-метасоматических систем: *внутриинтрузивной* и *околоинтрузивной*.

Внутриинтрузивная гидротермальная система формировалась в интервале времени от момента внедрения сиенитового расплава до завершения его кристаллизации, то есть соответствовала докристаллизационному и раннему посткристаллизационному периодам термической истории Рябинового массива. В эти периоды температура и давление водяных паров в области контактового воздействия интрузива прогрессивно возрастали, что способствовало образованию в ближайшем околоинтрузивном пространстве локальных тел известково-магнезиальных скарнов и зонально построенного ореола фенитизации. Внутри самой интрузии возникало контрастное термоградиентное поле, которое обеспечивало образование потоков остаточных высокотемпературных надкритических щелочных железо-калий-натриевых флюидов с химической дифференциацией их состава в пространстве, что предопределило возникновение внутриинтрузивной совокупности зон, представленных на глубине массива ореолом штокверковой

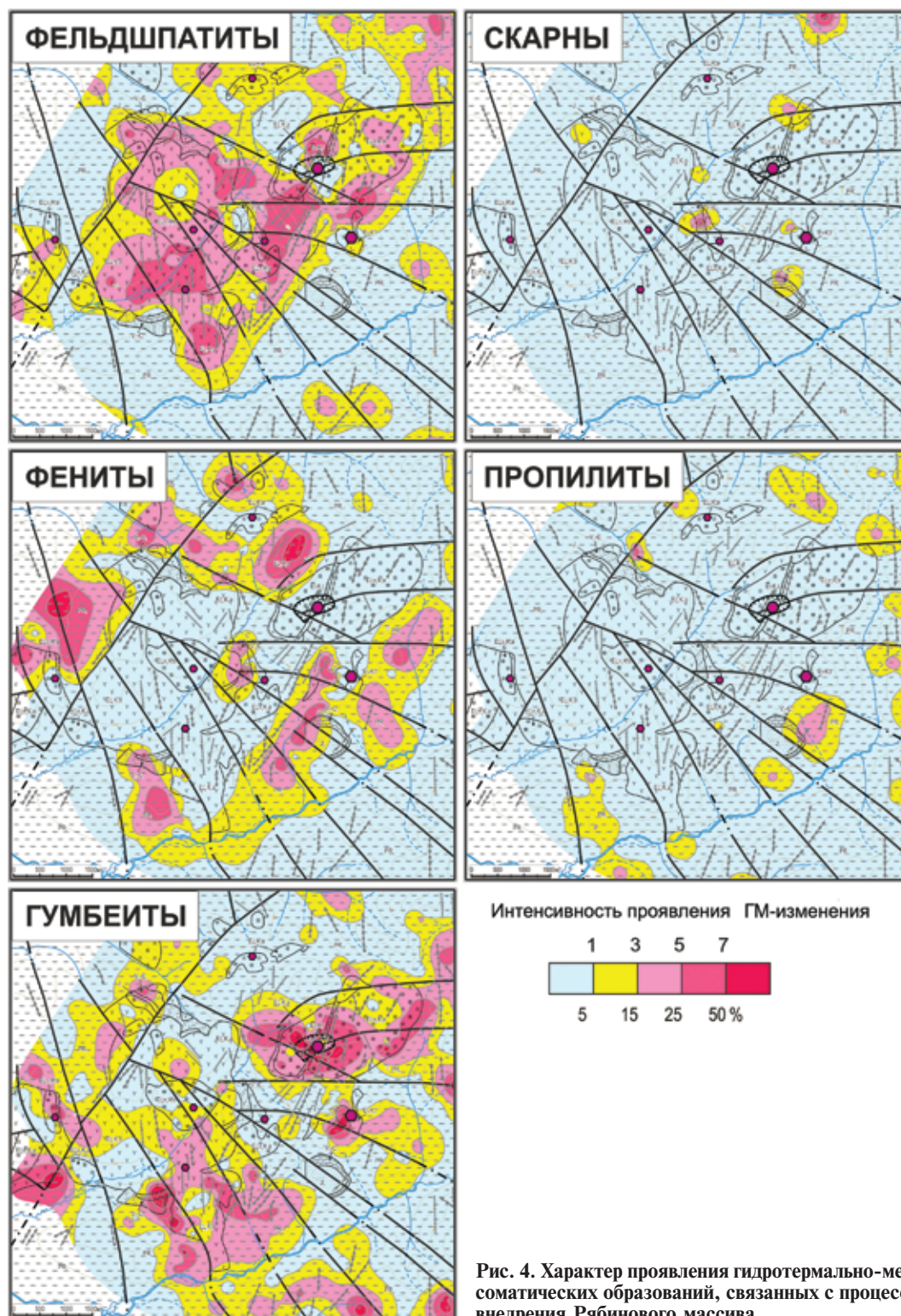


Рис. 4. Характер проявления гидротермально-метасоматических образований, связанных с процессом внедрения Рябинового массива

фельдшпатизации, а в его приповерхностных апикальных частях – ореолом развития мегакристаллических щелочнополевошпат-эгириновых гидротермалитов – фельдшпатитов-«пегматитов».

По мере остывания пород Рябинового массива в поздний посткристаллизационный период его термической истории во вмещающих породах начинает функционировать *околоинтрузивная* гидротермальная система. В этот период нагретые и преобразованные в ореоле контактового

воздействия в скарны и фениты вмещающие породы и само тело интрузии начинали остывать как единое целое, а превращенные в средне-низкотемпературные гидротермальные растворы в термоградиентном поле массива вадозные (седиментационные) воды за счет резкого падения гидростатического давления в надинтрузивной области – циркулировать в сторону контакта с массивом. Эти растворы, имевшие первоначально субщелочную (CaFeMg) реакцию,

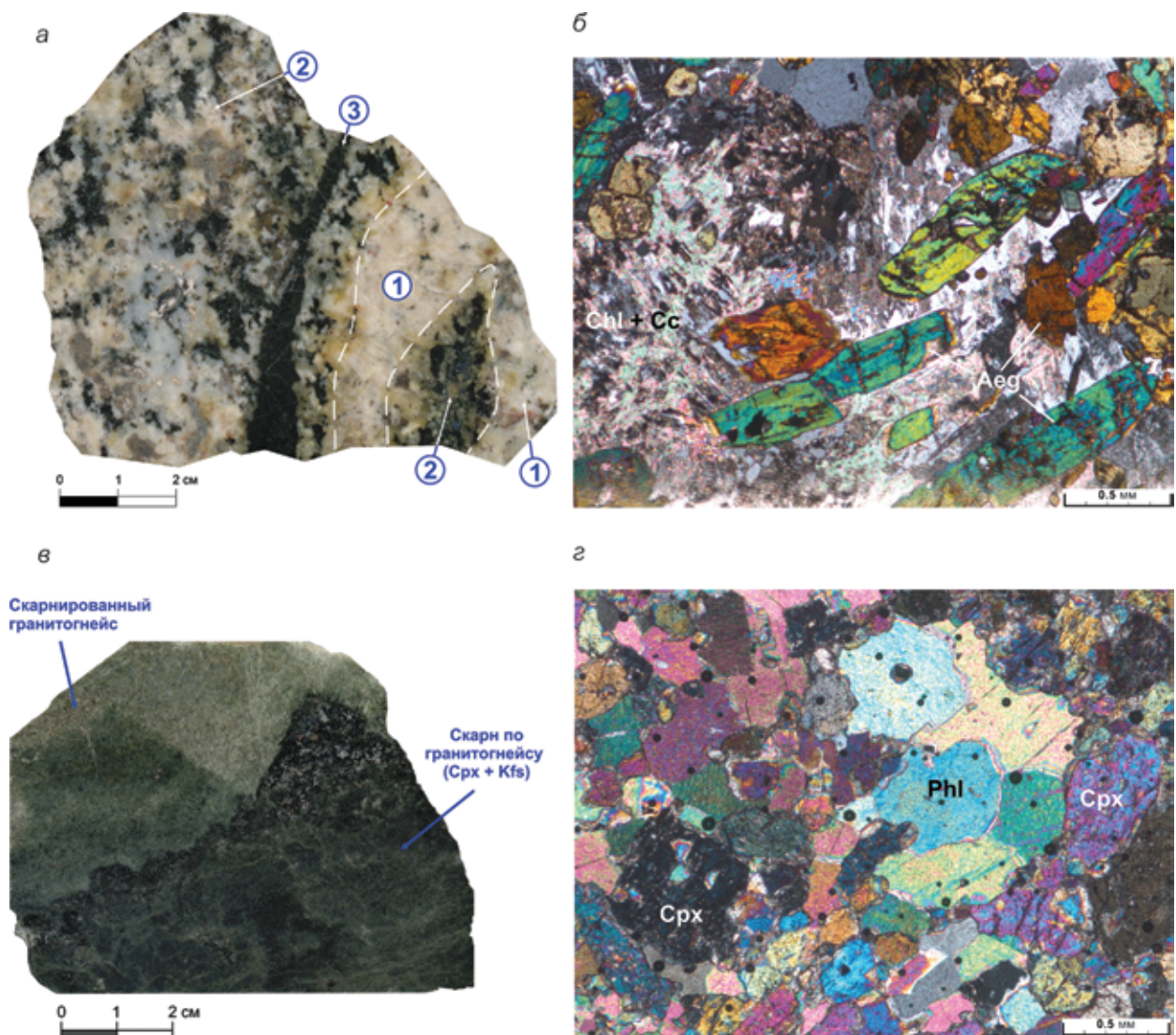


Рис. 5. Характер проявления процессов околоинтрузивной фенитизации и скарнирования во вмещающих Рябиновый массив метаморфических и осадочных породах протерозоя, венда и кембрия

а, б – обр. 1012, околоинтрузивная фенитизация, обусловленная процессом внедрения Рябинового сиенитового массива, в виде короткопрожилковых обособлений и автоморфных агрегатов несовершенного строения калишпат-эгиринового состава объемно развивается в исходных гнейсогранитах с формированием серии последовательных зон метасоматической колонки;

а – фото образца (1–3 – зоны метасоматической колонки: 1 – исходный умеренно хлоритизированный и карбонатизированный двуполевошпатовый биотит-роговообманковый гнейсогранит, 2 – зона интенсивной фенитизации с реликтами исходных гнейсогранитов, в пределах которой эгирин в ассоциации с калишпатом образует короткопрожилковые обособления и автоморфные агрегаты несовершенного строения, 3 – полнопроявленный эгириновый магнетит- и титанитсодержащий жилкообразный гидротермалит);

б – микрофотография шлифа (николи +), характеризующая зону 2 метасоматической колонки, в пределах которой эгирин (Aeg) образует крупные короткопризматические метакристаллы, развивающиеся за счет зерен хлоритизированного и карбонатизированного биотита и роговой обманки (Chl + Cc) исходной породы;

в, г – обр. 1038, проявление процесса скарнирования в гранитогнейсах докембрийского возраста из экзоконтактной области Рябинового сиенитового массива;

в – фото образца. Полнопроявленный мелкокристаллический скарновый метасоматит (темно-зеленая зона), сложенный на 85–90 % клинопироксеном и 5–10 % альбитизированным калишпатом, образует внутреннюю зону метасоматической колонки. Промежуточная зона (светло-зеленая) представлена скарнированным гранитогнейсом, сложенным на 45–50 % новообразованиями клинопироксена и 45–50 % реликтовыми минералами исходной породы – кварцем, микроклином и реже плагиоклазом;

г – микрофотография шлифа (николи +), иллюстрирующая особенности строения флогопит-клинопироксенового агрегата из внутренней зоны метасоматической колонки скарнирования доломитов, в котором клинопироксен (Cpx) слагает сплошные мелкокристаллические агрегаты и отдельные зерна короткостолбчатой формы, как бы плавающие в ксенобластическом флогопитовом (Phl) матрице

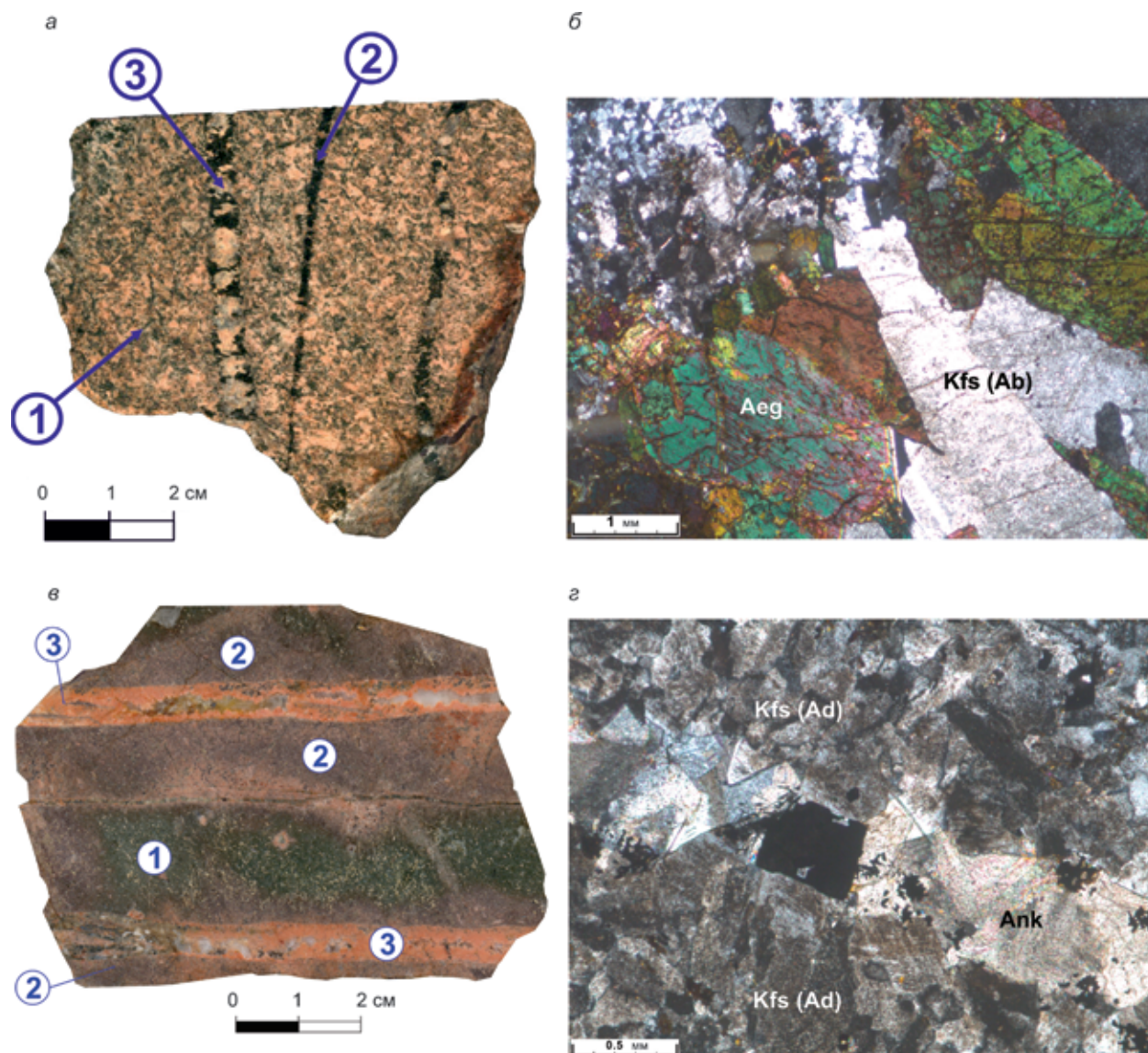


Рис. 6. Характер проявления процессов внутриинтрузивной фельдшпатизации и гумбеитизации в магматических породах Рябинового массива. Карьер Рябинового месторождения, участок Мусковитовый

a, б – обр. МТ-62, формирование тонких зонально построенных прожилков щелочнополевошпат-эгиринового состава в умеренно фельдшпатизированных кварцевых сиенитах алданского плутонического комплекса;

a – фото образца (1–3 – зоны метасоматической колонки: 1 – внешняя – исходный среднезернистый эгирин-авгитовый щелочнополевошпатовый кварцевый сиенит, 2 – промежуточная, выраженная интенсивной перекристаллизацией крупнозернистой кварц-щелочнополевошпатовой основной массы породы вдоль короткопрожилковых обособлений эгирина, 3 – внутренняя – полно проявленных фельдшпатитов);

б – микрофотография шлифа (николи +), иллюстрирующего параллельно-шестоватое внутреннее строение щелочнополевошпат-эгиринового (Kfs/Ab + Aeg) прожилка из внутренней зоны метасоматической колонки фельдшпатизации;

в, г – обр. 1002-А, проявление прожилковой гумбеитизации в средне-мелкокристаллических меланократовых эгирин-авгитовых щелочнополевошпатовых сиенитах тобукского гипабиссального комплекса;

в – фото образца (1–3 – зоны метасоматической колонки околорудной гумбеитизации: 1 – внешняя зона – исходный слабокалишпатизированный меланократовый сиенит, 2 – промежуточная зона, фиксируемая в виде оторочек незначительной мощности вдоль гумбеитовых прожилков и характеризующаяся полным разложением кристаллов эгирин-авгита и их замещением агрегатными псевдоморфозами кварц-анкерит-пирит-гематитового состава и формированием сплошных калишпатовых агрегатов бурого цвета, 3 – внутренняя зона);

г – микрофотография шлифа (николи +), характеризующего особенности строения внутренней зоны метасоматической колонки, сложенной на 70–75 % бурым адуляроподобным калишпатом – Kfs (Ad), который ближе к ядерной части прожилков сменяется анкеритом (Ank) с небольшой примесью кварца, барита и сульфидов, главным образом пирита кубической формы и реже халькопирита

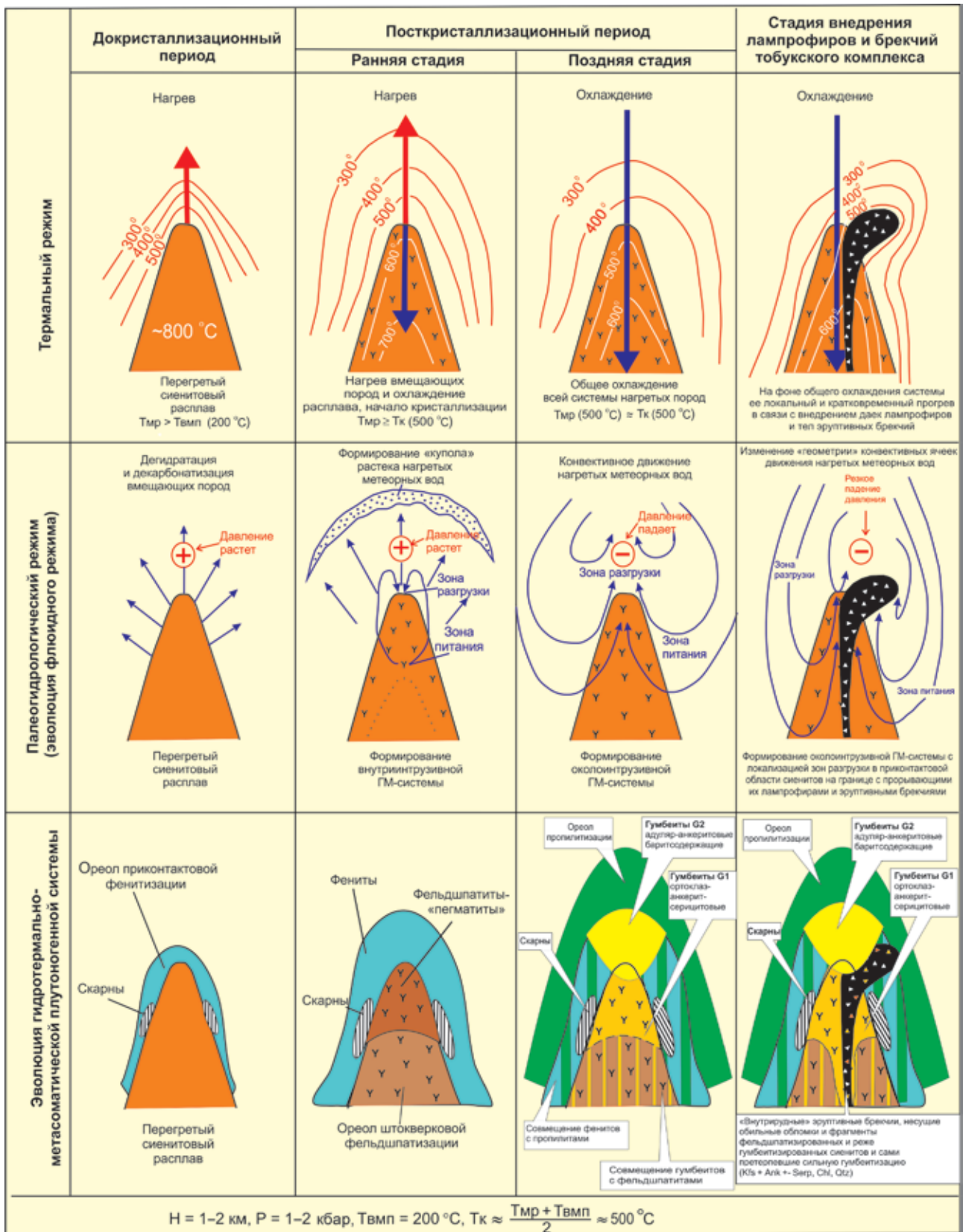


Рис. 7. Геолого-генетическая модель формирования гидротермально-метасоматической порфировой системы, обусловленной процессом внедрения Рябинового сиенитового массива

H – глубина внедрения Рябинового сиенитового массива (1–2 км); P – литостатическое давление; Т_к – температура вмещающих пород на контакте с магматическим расплавом – 500 °С; Т_{мр} – температура магматического расплава – 800 °С; Т_{вмп} – температура вмещающих пород на момент внедрения сиенитового расплава – 200 °С

эволюционировали в сторону повышения щелочности, создавая в околоинтрузивном пространстве совокупность сопряженных зон пропилизации и гумбеитизации. Возникшие в этих условиях приконтактовые зоны пропилизации несут в себе признаки формирования в термодиагентном поле Рябинового массива. Фактически эти участки пропилизации являлись областями питания околоинтрузивной гидротермальной системы.

В то же время область разгрузки околоинтрузивной гидротермальной системы, представленная ореолами гумбеитизации, большей своей частью оказалась совмещенной в пространстве с более ранними и высокотемпературными внутриинтрузивными фельдшпатитами-«пегматитами», что во многом и предопределило специфику и последовательность процессов минералообразования на самом Рябиновом месторождении.

Однако на этапе формирования рудоносных гумбеитов вышерассмотренная последовательность развития процессов минералообразования, обусловленная эволюцией порфировой плутоногенной гидротермальной системы Рябинового сиенитового массива, была нарушена внедрением внутригумбеитовых малых тел меланократовых магматических пород и эксплозивных брекчий тобукского комплекса, сыгравших исключительно важную роль в локализации золото-медно-порфировой минерализации. Именно к участкам гумбеитизированных сиенитов алданского комплекса на контакте с прорывающими их малыми телами тобукского и приурочено основное промышленно значимое оруденение на Рябиновом месторождении.

Скорее всего, это было обусловлено кардинальной перестройкой гидродинамического режима гидротермальной порфировой системы в связи с взрывообразным проявлением процессов брекчиеобразование и внедрения малых тел тобукского комплекса, что привело к смещению (засасыванию) потока гумбеитизирующих щелочных углекисло-калиевых флюидов в сторону контакта с этими малыми телами.

Установленная современная картина в распределении вышерассмотренных зон гидротермальных изменений является, с одной стороны, отражением вещественных и структурно-тектонических неоднородностей в строении самого Рябинового массива и его морфологии, а с другой, в условиях сильно расчлененного рельефа (600–1150 м) – неравномерного среза современной эрозионной поверхностью трех субпараллельных зон чехольного типа, сменяющих друг друга во внутриинтрузивном пространстве снизу вверх (в направлении вектора максимальной изменчивости): фельдшпатиты-«пегматиты» → гумбеиты карбонат-серицит-мусковит-ортоклазовой фации (G1) → гумбеиты кварц-карбонат-барит-адуляровой фации (G2). То есть в этом ряду гидротермалитов гумбеиты фации G2 занимают самое верхнее звено вертикальной метасоматической колонны. На этом основании

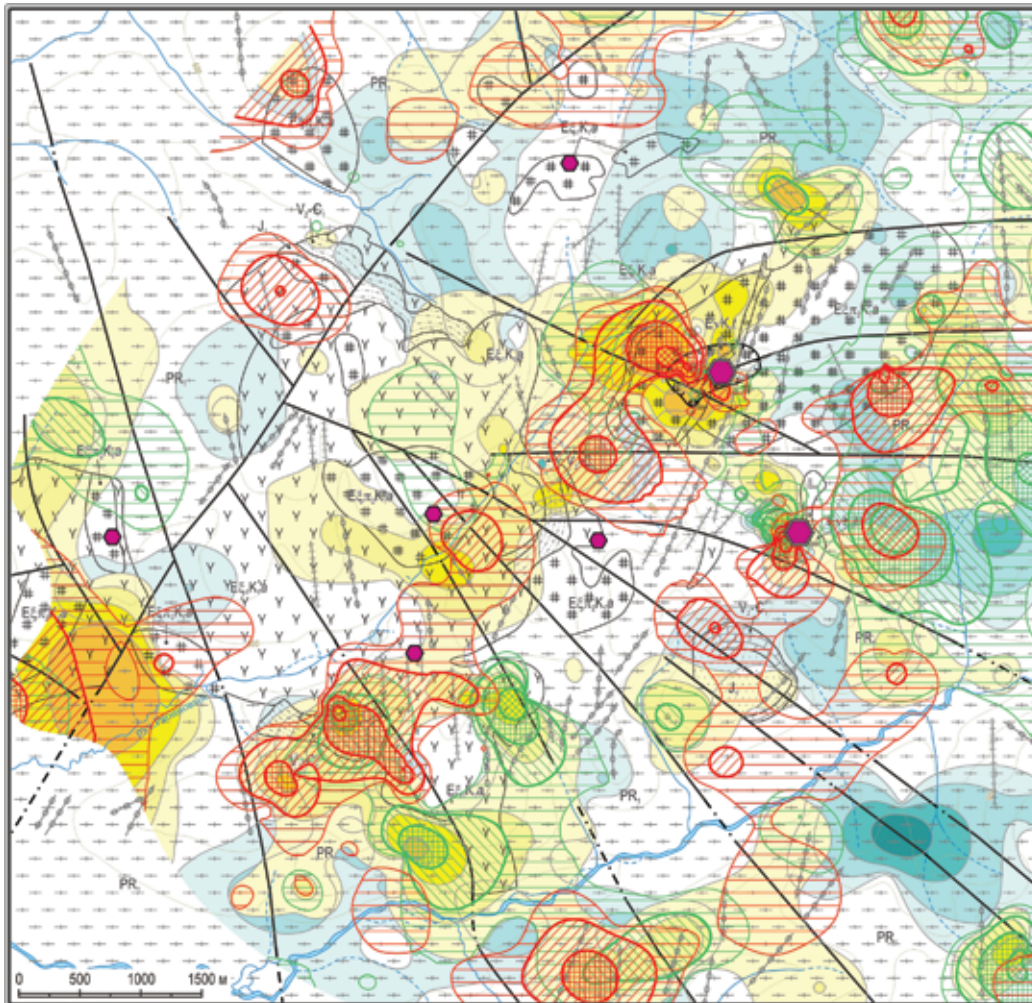
ореолы гумбеитизации фации G2 могут рассматриваться в качестве индикаторов наименьшего уровня эрозионного среза вертикальной колонны рудоносных метасоматитов на территории рудного поля.

Установленная в пределах Рябинового рудного поля вертикальная гидротермально-метасоматическая зональность по многим показателям соответствует типовой модели строения вертикальной метасоматической зональности порфирового месторождения, предложенной Дж. Лоувелом и Дж. Жильбертом [30] и актуализированной Р. Силлитом [35] по результатам обобщения большого фактического материала о порфириновых месторождениях мира. Главные различия между ними заключаются в преобладании в строении гидротермально-метасоматической зональности Рябинового рудного поля по сравнению с типовой моделью порфириновой системы щелочных калий-натриевых, калиевых и углекисло-калиевых метасоматитов – фельдшпатитов, фенитов и гумбеитов – при почти полном отсутствии производных кремне-кислотного метасоматоза, таких как березиты, филлизиты и аргиллизиты [2; 7; 16; 18; 22; 29; 31; 36], что, скорее всего, было обусловлено ультракалиевой специализацией ($K_2O = 8–12\%$) самих магматических пород Рябинового массива, предопределивших высокую активность калия в гидротермальных флюидах на всех стадиях постмагматической плутоногенной гидротермальной деятельности.

Геохимическая зональность. В отличие от результатов минералого-петрографического изучения гидротермально измененных пород Рябинового рудного поля, обсуждению их геохимических особенностей посвящено совсем небольшое количество публикаций. Среди них нельзя не отметить работы А. Я. Кочеткова с соавторами [14], В. А. Коваленкера с соавторами [9], В. Г. Ветлужских с соавторами [1], Г. П. Дворника [3–5] и др. Однако, как и в случае с метасоматитами, проведенные этими исследователями геохимические работы касались исключительно площади самого Рябинового месторождения и не распространялись на всю территорию одноименного рудного поля.

Использование авторами статьи специальной методики комплексного петрографо-геохимического изучения и картирования гидротермально-метасоматических образований позволило составить, наряду с картой гидротермально-метасоматической зональности, также и карту аномального геохимического поля (по данным опробования коренных пород) в м-бе 1 : 50 000 (рис. 8–10).

Анализ полученных геохимических материалов демонстрирует, что проявление в породах Рябинового рудного поля разнофациальных гидротермально-метасоматических образований, связанных с процессом внедрения одноименного сиенитового массива, привело к глубокому перераспределению в породах района целого ряда химических элементов и, как результат,



Геохимические ассоциации	Содержание элементов, в единицах фона			
	1.5	2.5	5.0	10.0
AuAgCuBi	Yellow	Yellow with horizontal lines	Yellow with diagonal lines	Yellow with cross-hatch
BaMoPb	White	White with horizontal lines	White with diagonal lines	White with cross-hatch
AsSbHg	White	White with horizontal lines	White with diagonal lines	White with cross-hatch
REEZrNbTaUThBe	Light blue	Light blue with horizontal lines	Light blue with diagonal lines	Light blue with cross-hatch

Рис. 8. Особенности строения аномального геохимического поля территории Рябинового рудного поля (по данным опробования коренных пород)

формированию положительных и отрицательных геохимических ореолов.

В табл. 3 приводится сводная информация о геохимической специализации главных типов гидротермально-метасоматических образований Рябинового рудного поля.

Эгириновые фельдшпатиты-«пегматиты», наиболее масштабно проявившиеся внутри самого интрузива, по сравнению с близкими им по составу фенитами, получившими развитие в ореоле контактового воздействия Рябинового сиенитового массива, отличаются незначительным накоплением Au, Ag, Cu, V, Zr и Hf при существенной деконцентрации Nb, Ta, U, Th, Be, Sn, Pb, Y и всех трех групп редкоземельных элементов (LREE, MREE, HREE).

Приконтактовая фенитизация, наоборот, характеризуется многократным (сверх фоновых

значений) накоплением этих элементов (Nb, Ta, U, Th, Be, Sn, Pb, Y) и особенно средних и тяжелых редких земель (MREE, HREE), что свидетельствует о глубокой взаимосвязи и взаимообусловленности на геохимическом уровне процессов минералообразования, протекавших во внутриинтрузивной и околоинтрузивной зонах Рябинового сиенитового массива на ранне-посткристаллизационной стадии его становления.

Скарны и пропилиты отмечаются многократным (сверх фоновых значений) накоплением Li, а также Sr, Ba, некоторых сидерофильных (Co, Ni, Cr, Mn, Ti) и редкоземельных элементов (особенно MREE и HREE).

Гумбеиты как околорудные метасоматиты отличаются ярко выраженной склонностью к концентрированию Au, Ag, Cu, Mo, Bi и в меньшей степени Ba, Mo, Pb, Hg, Sb и As.

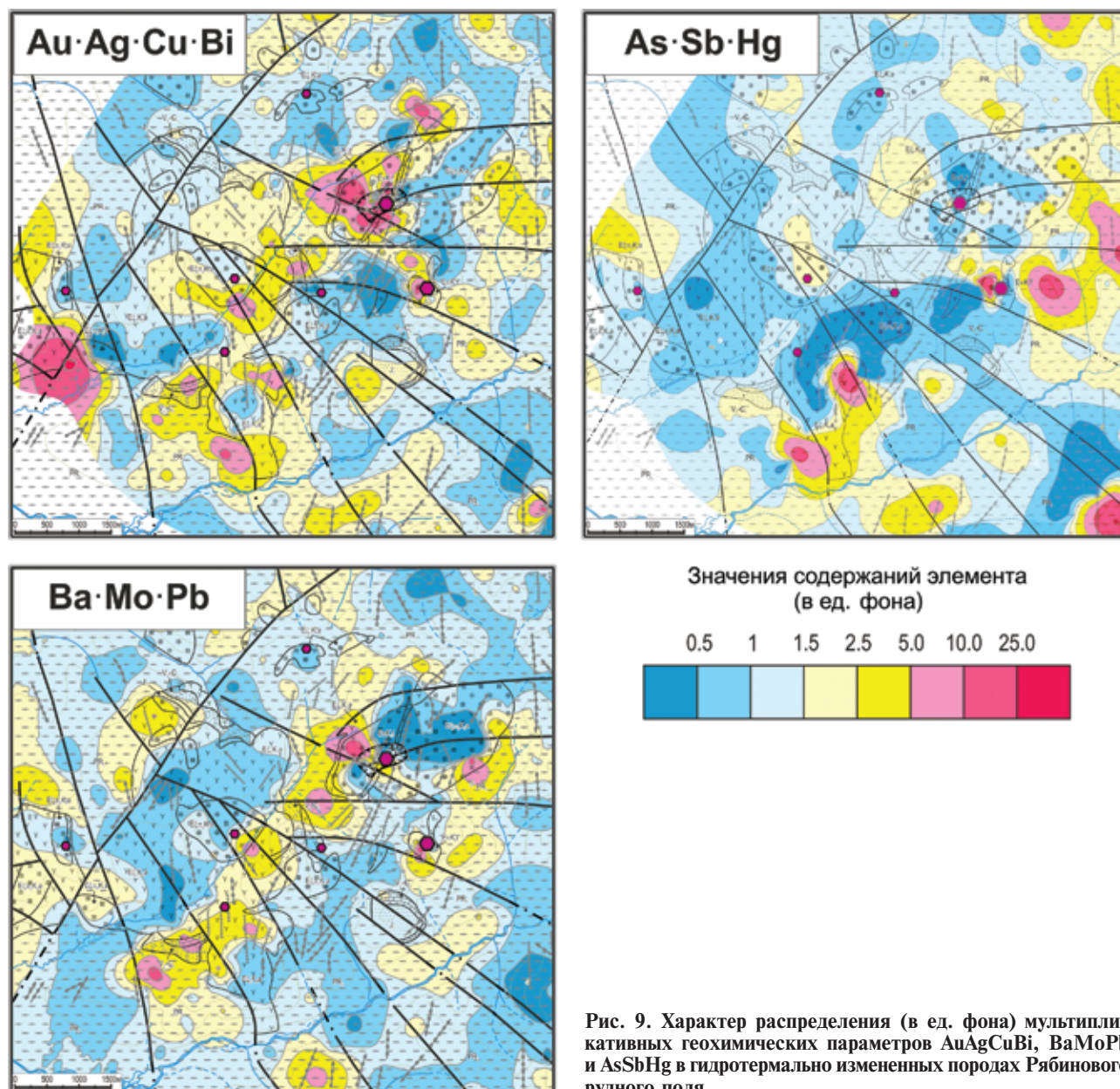


Рис. 9. Характер распределения (в ед. фона) мультипликативных геохимических параметров AuAgCuBi, BaMoPb и AsSbHg в гидротермально измененных породах Рябинового рудного поля

Выявленные геохимические характеристики гидротермально-метасоматических образований предопределили и особенности строения аномального геохимического поля, которое во многом, как показано на рис. 8–10, наследует закономерности строения гидротермально-метасоматической зональности с концентрически зональным, как и у нее, трендом в распределении положительных геохимических ореолов.

Ядро этой зональности в пределах интрузива слагают AuAgCuBi, BaMoPb и AsHgSb ореолы, связанные с проявлением там гумбеитов двух фациальных разновидностей – карбонат-серицит-мусковит-ортоклазовой (G1) и кварц-карбонат-барит-адуляровой (G2), а ее периферию – в приконтактной области массива среди вмещающих пород докембрия, венда-кембрия и юры – положительные геохимические ореолы

NbZrYUTh, LREE, MREE, HREE и CoNiCr составов, что обусловлено проявлением здесь процессов фенитизации и скарнирования и сменяющей их во времени пропилитизации.

Кроме того, как показано на рис. 11, в пределах самих ореолов гумбеитизации устанавливается четкая взаимосвязь между изменением с глубиной минерального состава окolorудных метасоматитов, их фациальной принадлежности и геохимической специализации. Так, например, содержания Ba, Mo, Pb, As, Sb и Hg отчетливо и монотонно возрастают в окolorудных метасоматитах с подрудных горизонтов (500–600 м) к верхнерудным и надрудным (> 850 м), являясь индикаторами незначительного уровня эрозийного среза вертикальной рудно-геохимической зональности современной дневной поверхности (см. рис. 8). Содержания Cu, Bi, Au и Ag в этом

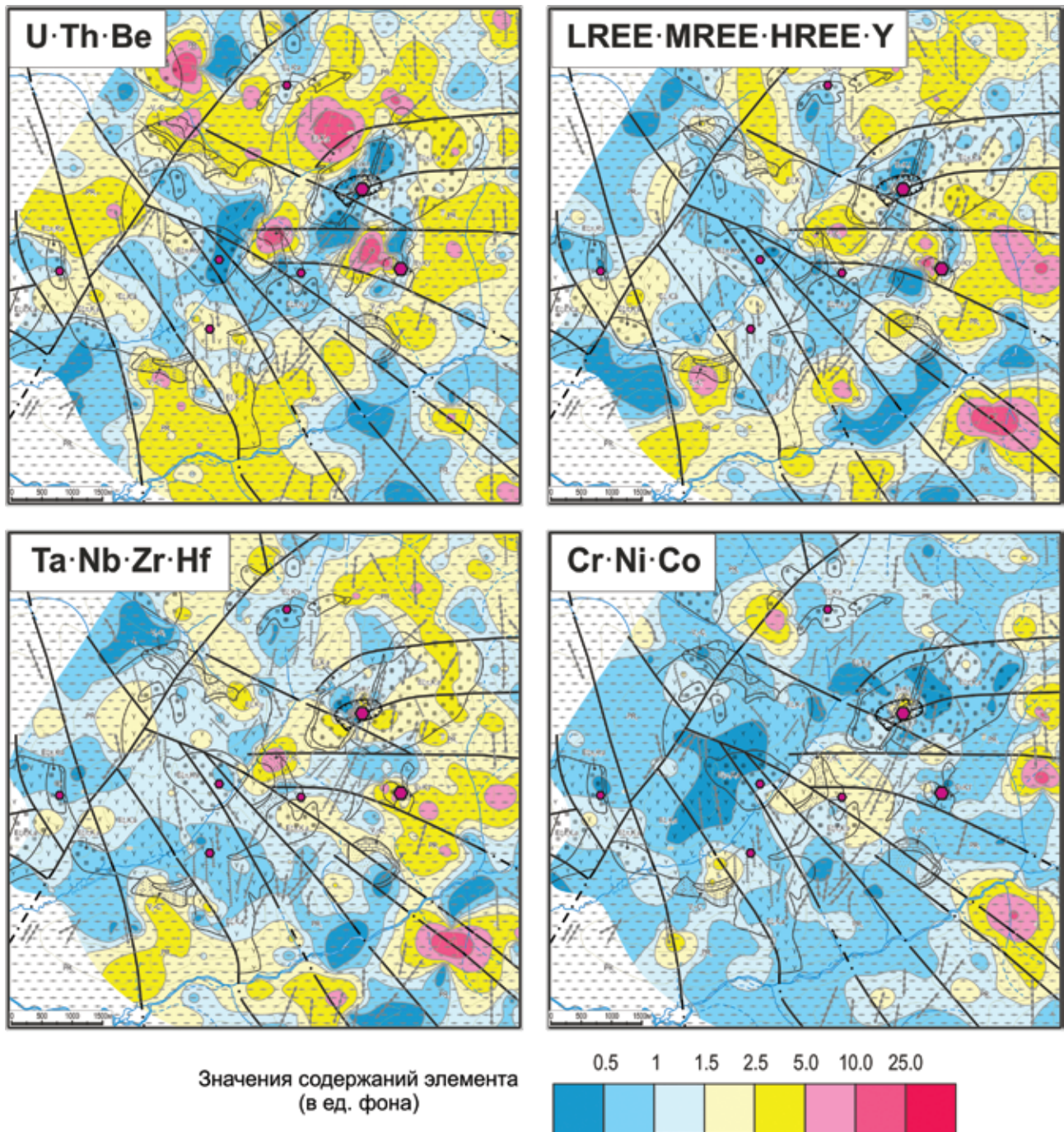


Рис. 10. Характер распределения (в ед. фона) мультипликативных геохимических параметров UThBe, LREE, MREE, HREE, Y, TaNbZrHf и CrNiCo в гидротермально измененных породах Рябинового рудного поля

направлении в интервале глубин от 650 до 850 м сначала резко накапливаются, а затем начинают постепенно падать вверх по восстанию (Cu + Bi – интенсивно, а Au + Ag – постепенно), фиксируя тем самым нижнерудный и центрорудный уровни вертикальной рудно-геохимической зональности. Содержания некоторых сидерофильных (Cr, Ni, Co) и литофильных (REE, Sn, Sr и др.) элементов вверх по восстанию вертикальной колонны околорудных метасоматитов закономерно уменьшаются во многие десятки раз, то есть испытывают в этом направлении глубокую

деконцентрацию. Таким образом, положительные мультипликативные ореолы Co, Ni, Cr, Sn и Sr определяют геохимический состав подрудных горизонтов вертикальной рудно-геохимической зональности рудного поля.

Прогнозно-минерагенический анализ. На рис. 12 приведены модели-реконструкции вертикальной гидротермально-метасоматической, геохимической и рудно-метасоматической зональностей, построенные методом интерполяции всех полученных минералого-петрографических

Привнос-вынос элементов в ходе формирования главных типов гидротермально измененных пород Рябинового рудного поля

Элементы	Гумбеиты	Пропилиты	Скарны	Фениты	Фельдшпаты-«пегматиты»	Березиты	Фельдшпато-литы
Si	-8	-15	-6	7	1	-4	1
Al	-4	14	-28	9	-4	-25	-10
Ti	-14	194	-22	4	-2	9	-18
Fe ³⁺	19	253	168	31	120	-19	15
Fe ²⁺	-7	73	948	57	-12	-35	-45
Mn	-35	189	155	43	30	514	-60
Mg	-15	151	4647	45	-21	538	-82
Ca	-19	604	1029	9	-34	62	-78
Na	-85	-71	-60	-36	16	-3	-20
K	10	-14	-51	61	12	11	14
P	52	59	-17	-28	-56	-50	-65
C	217	9	208	275	41	168	-38
S	2551	-40	81	12	17	0	0
H	16	160	514	-43	64	69	-21
Sc	-55	75	45	-14	-5	-18	4
V	-22	178	16	303	130	11	-18
Cr	-29	126	-50	-21	7	-6	10
Co	-39	148	285	15	-20	20	-16
Ni	-17	177	87	-41	-32	-27	-12
Rb	-29	-56	-12	5	-21	-45	26
Sr	-42	626	193	-40	-55	-10	-50
Ba	4	164	178	-68	8	88	-33
Zr	-32	-35	-12	-17	44	235	158
Hf	-29	-32	5	-20	45	265	146
Nb	13	391	152	124	-39	122	300
Ta	-1	597	425	82	-52	113	261
Th	-57	25	-27	301	-45	97	212
U	35	68	138	102	2	-18	11
Be	-30	692	122	152	-12	-12	-9
Li	-16	976	2549	-7	-31	55	24
W	104	25	-38	-7	49	-1	76
Mo	172	29	-99	-21	-7	-20	38
Sn	-15	70	40	114	69	57	105
B	10	-7	-31	0	-6	-14	19
Au	5970	-51	84	24	315	-19	-25
Ag	1021	135	898	75	270	56	104
Cu	220	40	755	7	115	13	43
Pb	70	98	357	147	-29	138	45
Zn	-8	301	1523	28	14	37	69
Bi	19	-34	112	23	-15	25	13
Hg	102	2	24	13	-12	-23	3
Sb	252	55	228	8	44	-19	-20
As	205	9	-80	-18	-39	-23	183
Ge	17	72	410	-28	15	40	22
Ga	-12	2	-30	74	14	53	17
Y	-4	156	198	116	-60	96	202
LREE	-45	61	67	2	-71	91	132
MREE	-25	116	120	23	-71	85	115
HREE	-2	149	178	97	-36	120	226
Δρ, г/см ³	-0,04	+0,24	+0,54	+0,29	+0,24	-0,04	-0,01
n	117	21	5	39	57	34	28

Примечание. Коэффициент привноса-выноса элементов (ΔC) приведен в процентах и рассчитывался по формуле: $\Delta C = (C_i - C) / C \times 100 \%$, где C_i – содержание элемента в интенсивно/полностью измененной породе, C – содержание элемента в минимально измененной породе. Для главных компонентов расчет баланса вещества осуществлялся атомно-объемным методом с учетом плотностных характеристик исходных пород и замещающих их метасоматитов (Казизын, Рудник, 1968). n – общее количество проб в сравниваемых выборках.

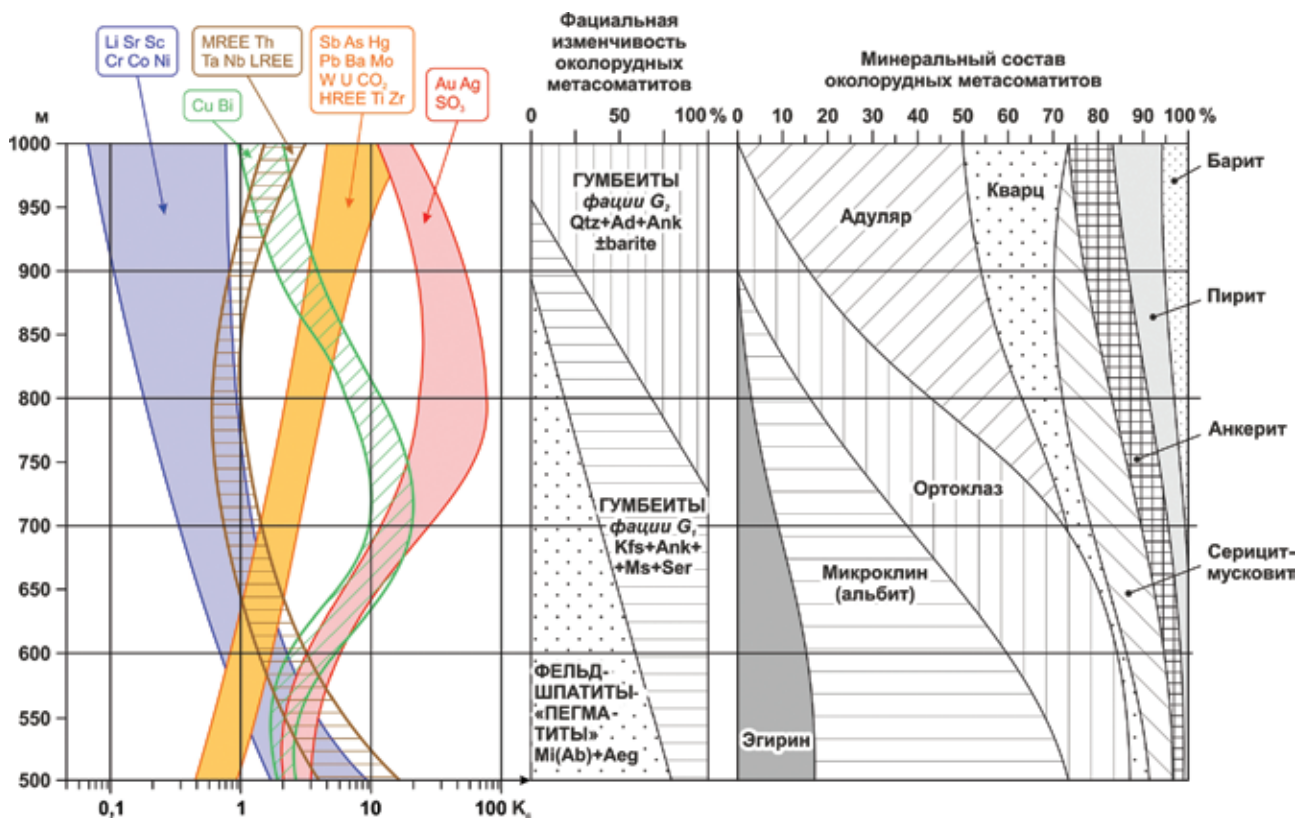


Рис. 11. Закономерности изменения с глубиной минерального состава околорудных метасоматитов, их фациальной принадлежности и геохимических особенностей в минерализованных породах Рябинового сиенитового массива

и петрогеохимических данных по профилю, пересекающему Новый и Мусковитовый участки Рябинового месторождения.

На основе обобщения всех вышерассмотренных материалов может быть предложена совокупность геоморфологических, магматических, гидротермально-метасоматических и геохимических критериев прогнозной оценки территории Рябинового рудного поля на золото-медно-порфировое оруденение рябинового типа.

На рис. 13, а демонстрируется топографическая карта рельефа местности, иллюстрирующая характер и глубину эрозионного среза территории Рябинового рудного поля, что может быть использовано в качестве одного из геоморфологических критериев прогнозной оценки изучаемой территории на золото-медно-порфировое оруденение. Белой жирной линией выделена изогипса +600 м, ниже которой, как показало разведочное бурение в пределах Рябинового месторождения, богатая рудная минерализация на глубину не распространяется. Это свидетельствует о том, что глубина эрозионного среза территории рудного поля не была значительной и по этому показателю она практически вся может рассматриваться в качестве перспективной на обнаружение порфировой рудной минерализации.

На рис. 13, б показана совмещенная с моделью рельефа местности схема геологического строения территории Рябинового рудного поля, на которой синей линией с насечками выделена область

преимущественного распространения даек и штокообразных малых тел, контролируемых зонами разломов и сложенными меланократовыми магматическими породами и эруптивными брекчиями тобукского комплекса. В пределах Рябинового месторождения именно к участкам тектонически нарушенных и гидротермально измененных сиенитов алданского комплекса, расположенным на контакте с прорывающими их малыми телами и дайками тобукского комплекса, и приурочена промышленно значимая рудная минерализация. На этом основании такие потенциально рудо-контролирующие участки могут рассматриваться в качестве одного из структурно-магматических критериев прогнозной оценки территории Рябинового рудного поля на золото-медно-порфировое оруденение.

Процесс рудообразования на Рябиновом месторождении шел на фоне интенсивной калишпатизации и привноса в среду минералообразования калия (до 12–14 %). То есть высококалиевый характер щелочной специализации пород самого сиенитового массива хорошо согласуется с высококалиевой специализацией гумбейтовых гидротермалитов, контролирующих размещение золото-медно-порфировой прожилково-вкрапленной рудной минерализации. Именно с проявлением гумбейтизации на Мусковитовом и Новом участках Рябинового месторождения и связано формирование промышленной рудной минерализации. Поэтому сочетание ореолов

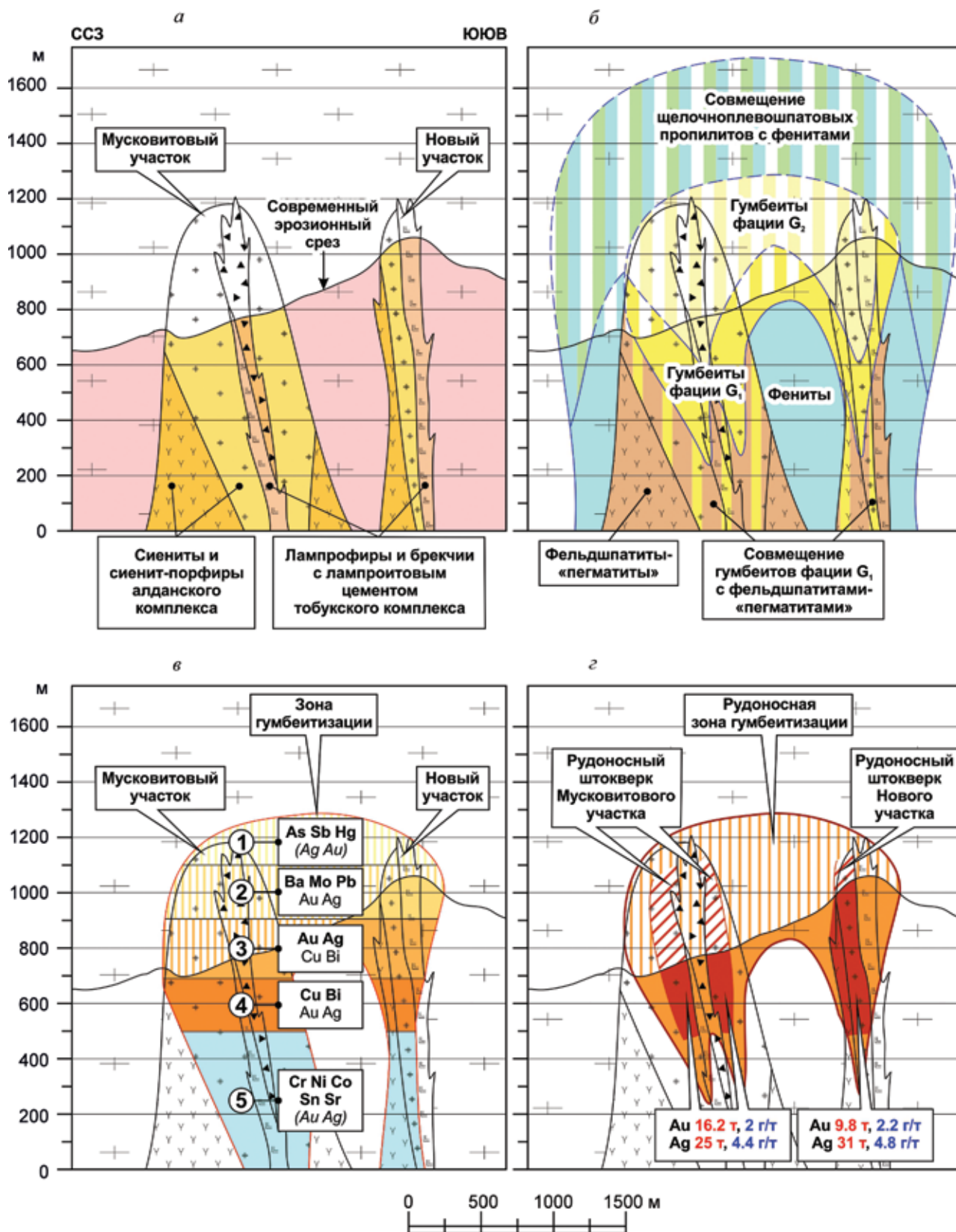
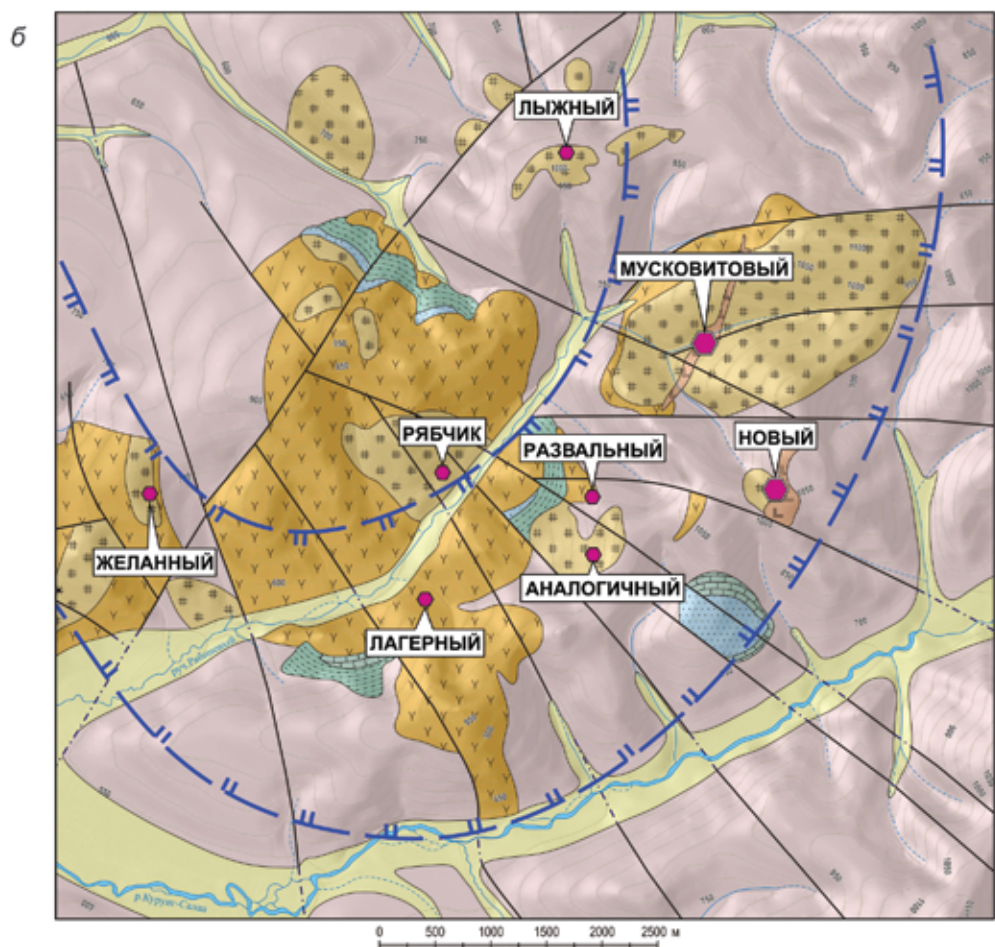
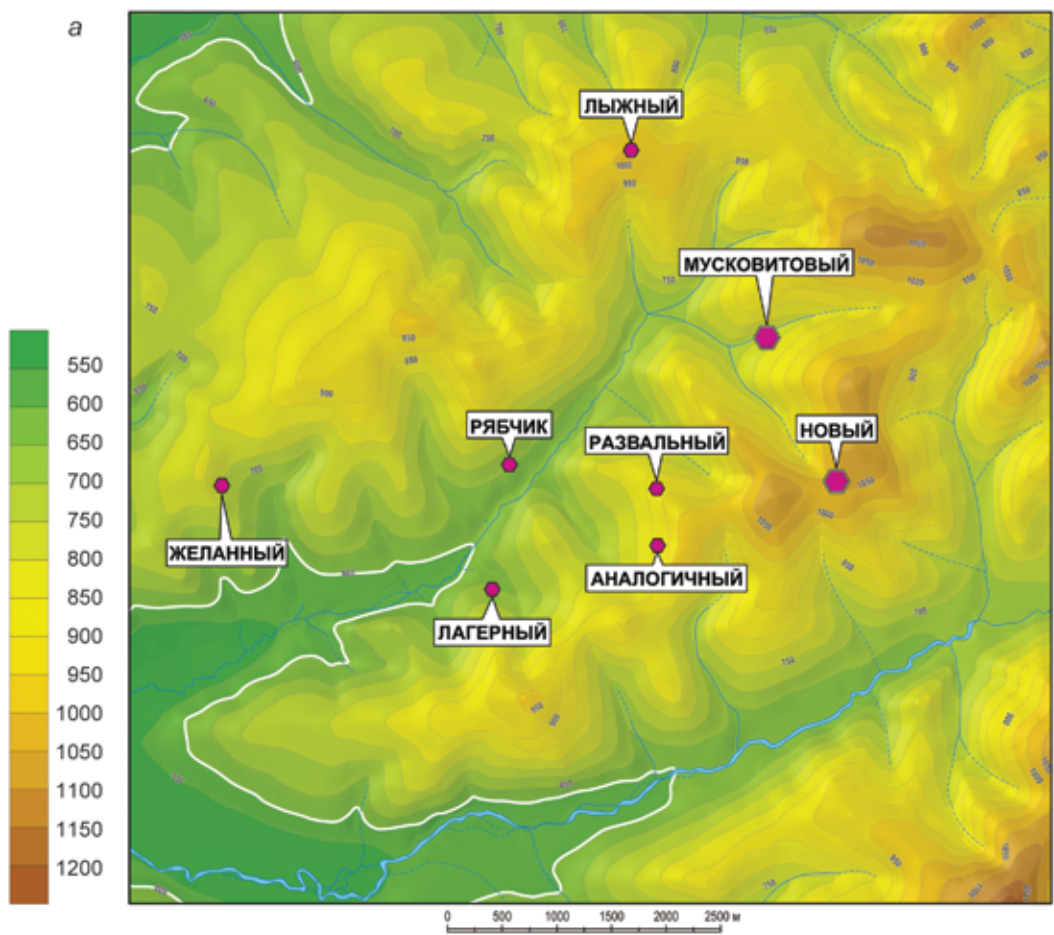
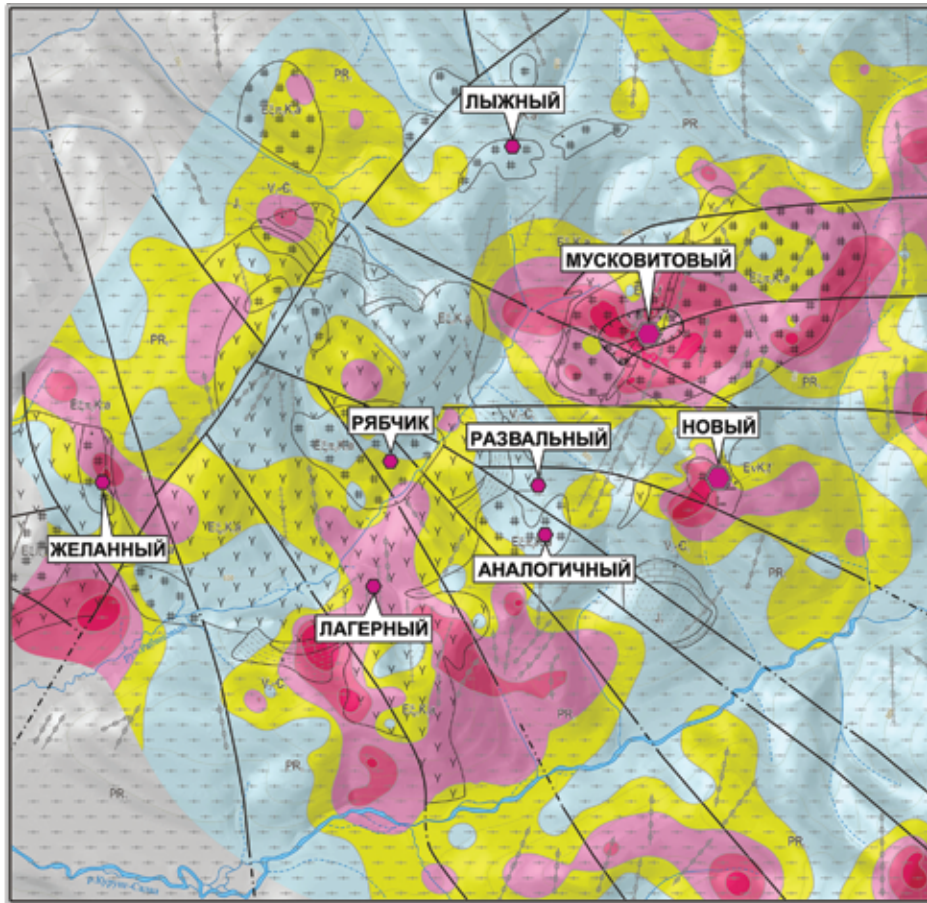


Рис. 12. Модели-реконструкции вертикальных зональностей Рябиновского рудного поля

а – геологический разрез; б – гидротермально-метасоматическая зональность; в – геохимическая зональность (ореолы: 1 – надрудного, 2 – верхнего рудного, 3 – центрального рудного, 4 – нижнего рудного и 5 – подрудного уровней); г – рудно-метасоматическая зональность



6



2

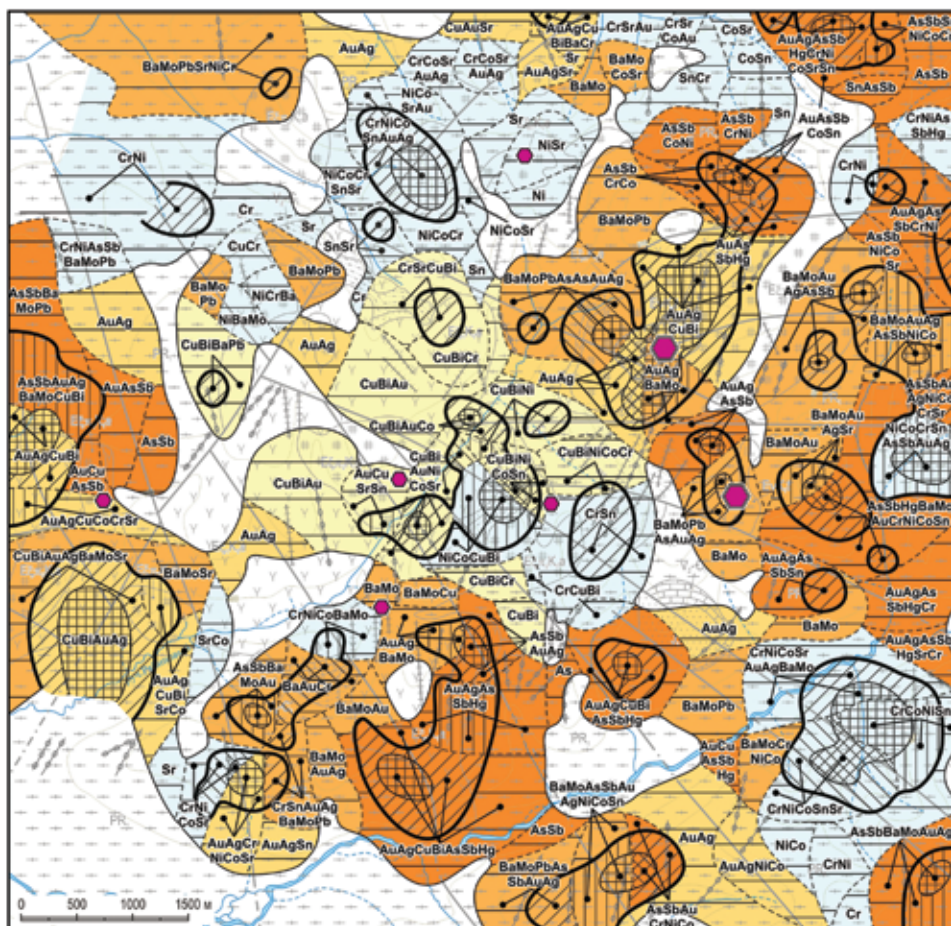


Рис. 13. Главные критерии прогнозной оценки территории Рябинового рудного поля на золото-медно-порфировое оруденение
а – геоморфологический: топографическая карта рельефа местности, иллюстрирующая характер и глубину эрозионного среза территории рудного поля. Белой жирной линией выделена изогипса +600 м, ниже которой, как показало разведочное бурение, богатая рудная минерализация, как правило, на глубину не распространяется;
б – структурно-магматический: совмещенная с моделью рельефа местности схема геологического строения территории рудного поля, на которой синей линией с насечками показана область преимущественного распространения малых тел, сложенных меланократовыми магматическими породами и эруптивными брекчиями тобукского комплекса;
в – гидротермально-метасоматический: интенсивность проявления рудоносных гумбейтов фаций G1 и G2 в коренных породах рудного поля;
г – геохимический: структура первичных геохимических ореолов. 1–3 – порядок положительных геохимических аномалий (в ед. фона): 1 – первый (1,5–5,0 C_ф), 2 – второй (5,0–10,0 C_ф), 3 – третий (≥ 10,0 C_ф); 4–8 – геохимические ореолы – индикаторы различных уровней эрозионного среза вертикальной рудно-геохимической зональности (см. рис. 12): 4 – подрудного [CrNiCoSnSr(AuAg)], 5 – нижнего рудного [CuBiAuAg], 6 – центрального рудного [AuAgCuBi], 7 – верхнего рудного [BaMoPbAuAg], 8 – надрудного [AsSbHg(AuAg)]

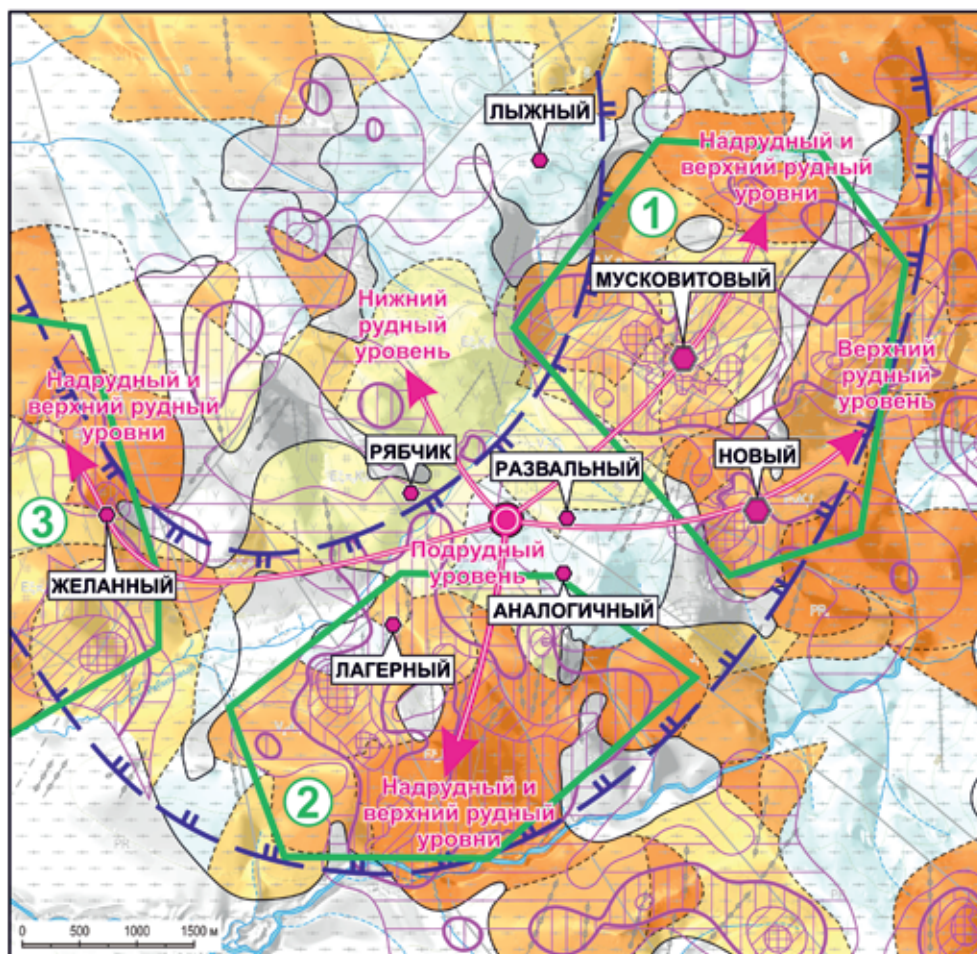


Рис. 14. Карта прогнозного районирования территории Рябинового рудного поля на золото-медно-порфировое оруденение

гумбеитизации (рис. 13, *в*) с близкими им по морфологии мультипликативными положительными геохимическими аномалиями AuAgCuBi, BaMoPb и AsSbHg составов (рис. 13, *з*) может быть использовано в качестве соответственно гидротермально-метасоматических и геохимических критериев прогнозирования золото-медно-порфировой минерализации.

На рис. 14 приводится Карта прогнозного районирования территории Рябинового рудного поля, где в графическом виде суммирована вся информация о распределении в пространстве значений всех вышеперечисленных критериев прогноза золото-медно-порфинового оруденения рябинового типа.

В результате проведенного прогнозно-минералогического анализа на территории рудного поля выделены три перспективных участка в ранге потенциально рудных месторождений, из которых участок 1 ($S = 8,3 \text{ км}^2$) соответствует территории Рябинового месторождения, то есть является определенным, тогда как два остальных участка – 2 ($S = 6,5 \text{ км}^2$) и 3 ($S = 3,3 \text{ км}^2$) могут быть отнесены к потенциальным.

Из них наиболее перспективным является участок 2. В пределах этого участка на площади в $6,5 \text{ км}^2$ закартирован обширный ореол гумбеитизации, вскрытый современной эрозионной поверхностью в интервале гипсометрических отметок от 650 до 950 м. В строении ореола адуляр- и баритсодержащие гумбеиты фации G2 преобладают над гумбеитами фации G1. К этому ореолу гумбеитизированных сиенитов, прорванных малыми телами меланократовых пород тобукского комплекса, приурочена близкая ему по морфологии и размерам крупная комплексная геохимическая положительная аномалия Au, Bi, Cu, Ag, Pb, Mo, Ba, As, Sb и Hg, в составе которой преобладают геохимические ореолы надрудного и верхнерудного уровней. Это свидетельствует о незначительном эрозионном срезе территории этого перспективного участка. В его пределах прогнозируется развитие на глубине жильково-вкрапленной рудной минерализации золото-медно-порфинового типа, проявленной как среди минерализованных сиенитов алданского комплекса, так и во вмещающих интрузив гумбеитизированных гранитоиднейсах и кристаллических сланцах докембрийского возраста. В пределах этого перспективного участка наиболее интересным в прогнозном отношении является его южная, юго-западная и центральная части, где рекомендуется проведение поисково-оценочных работ с целью выявления скрытого на глубине золото-медно-порфинового оруденения.

Таким образом, применение на территории Рябинового рудного поля комплексного подхода к изучению минералогических, петрографических и геохимических особенностей гидротермально-метасоматических образований позволило расшифровать историю проявления гидротермальной деятельности в районе, наметить в ней по изотопным данным место основных рубежей

рудообразования и, как следствие, осуществить в его пределах прогнозирование скрытого на глубине золото-медно-порфинового оруденения рябинового типа.

1. Ветлужских В. Г. Золоторудные месторождения Центрального Алдана / В. Г. Ветлужских, В. И. Казанский, А. Я. Кочетков, В. М. Яновский // Геология рудных месторождений. – 2002. – Т. 44, № 6. – С. 467–499.
2. Грабежев А. И., Белгородский Е. А. Продуктивные гранитоиды и метасоматиты медно-порфиновых месторождений (на примере Урала). – Екатеринбург: Наука, 1992. – 199 с.
3. Дворник Г. П. Серицит-микроклиновые метасоматиты и золотое оруденение Рябиновского рудного поля (Алданский щит) // Литосфера. – 2009. – № 2. – С. 56–66.
4. Дворник Г. П. Распределение золота и серебра в рудных телах Рябинового и Нового месторождений (Алданский щит) // Литосфера. – 2011. – № 4. – С. 119–130.
5. Дворник Г. П. Метасоматизм и золотое оруденение калиевых щелочных массивов (на примере Центрально-Алданской щелочной провинции). – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. – 329 с.
6. Жариков В. А. Метасоматизм и метасоматические породы / В. А. Жариков, В. Л. Русинов, А. А. Маракушев, Г. П. Зарайский, Б. И. Омеляненко и др. – М.: Научный мир, 1998. – 492 с.
7. Звездов В. С. Обстановки формирования и критерии прогноза крупных и сверхкрупных медно-порфиновых месторождений // Геология и охрана недр. – 2019. – № 4 (73). – С. 4–19.
8. Казицын Ю. В. Метасоматизм гидротермальных месторождений. – Л.: Недра, 1972. – 145 с.
9. Коваленкер В. А. Платиноносное золото-сульфидное оруденение Рябинового щелочного массива (Центральный Алдан, Россия) / В. А. Коваленкер, И. К. Мызников, А. Я. Кочетков, В. Б. Наумов // Геология рудных месторождений. – 1996. – Т. 38, № 4. – С. 345–356.
10. Коржинский Д. С. Петрология Турьинских скарновых месторождений меди. – М., 1948. – 148 с. – (Труды ИГН АН СССР; вып. 68).
11. Кочетков А. Я. О новом типе медно-порфинового оруденения // ДАН СССР. – 1982. – Т. 267, № 2. – С. 430–432.
12. Кочетков А. Я. Молибден-медно-золото-порфиоровое месторождение Рябиновое // Отечественная геология. – 1993. – № 7. – С. 50–58.
13. Кочетков А. Я. Рудоносность щелочных массивов Алданского щита. Рябиновское медно-золото-порфиоровое месторождение // Тихоокеанская геология. – 2006. – Т. 25, № 1. – С. 62–73.
14. Кочетков А. Я., Пахомов В. Н., Попов А. Б. Магматизм и метасоматизм Рябинового рудоносного щелочного массива (Центральный Алдан) // Магматизм медно-молибденовых рудных узлов. – Новосибирск: Наука, 1989. – С. 79–110.
15. Марин Ю. Б. Гранитоидные формации малых и умеренных глубин. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. – 143 с.
16. Медно-порфиоровые месторождения / А. И. Кривцов, В. С. Звездов, И. Ф. Мигачев, О. В. Минина. – М.: ЦНИГРИ, 2010. – 232 с.
17. Молчанов А. В. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции / А. В. Молчанов, А. В. Терехов, В. В. Шатов, О. В. Петров, К. А. Кукушкин, Д. С. Козлов, Н. В. Шатова // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 71. – С. 93–111.

18. Павлова И. Г. Медно-порфировые месторождения (Закономерности размещения и критерии прогнозирования). — Л.: Недра, 1978. — 275 с.
19. Плющев Е. В. Методика изучения гидротермально-метасоматических образований / Е. В. Плющев, О. П. Ушаков, В. В. Шатов, Г. М. Беляев. — Л.: Недра, 1981. — 262 с.
20. Плющев Е. В., Шатов В. В. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. — Л.: Недра, 1985. — 247 с.
21. Плющев Е. В., Шатов В. В., Кашин С. В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. — 559 с. — (Труды ВСЕГЕИ, Новая серия; т. 354).
22. Попов В. С. Геология и генезис медно- и молибден-порфировых месторождений. — М.: Наука, 1977. — 204 с.
23. Терехов А. В. Два типа рудоносных гумбеитов Эльконского золото-урановорудного узла (Южная Якутия) / А. В. Терехов, А. В. Молчанов, Н. В. Шатова, В. Н. Белова // Региональная геология и металлогения. — 2014. — № 60. — С. 71–86.
24. Угрюмов А. Н., Дворник Г. П. Щелочные рудоносные метасоматиты Рябинового массива (Алданский щит) // Советская геология. — 1984. — № 9. — С. 84–94.
25. Шатов В. В. Петрография, геохимия и изотопное (U-Pb и Rb-Sr) датирование щелочных магматических пород Рябинового массива (Южная Якутия) / В. В. Шатов, А. В. Молчанов, Н. В. Шатова, С. А. Сергеев, В. Н. Белова, А. В. Терехов, А. В. Радьков, О. Л. Соловьев // Региональная геология и металлогения. — 2012. — № 51. — С. 62–78.
26. Шатова Н. В. Геохронология щелочных магматических пород и метасоматитов Рябинового массива (Южная Якутия) на основе изотопно-геохимического (U-Pb, REE) исследования циркона / Н. В. Шатова, С. Г. Скублов, А. Е. Мельник, В. В. Шатов, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, С. А. Сергеев // Региональная геология и металлогения. — 2017. — № 69. — С. 33–48.
27. Шатова Н. В. Рябиновое медно-золото-порфировое месторождение (Южная Якутия): Геологическое строение, геохимия изотопов благородных газов и изотопное (U-Pb, Rb-Sr, Re-Os) датирование околорудных метасоматитов и оруденения / Н. В. Шатова, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, В. В. Шатов, О. В. Петров, С. А. Сергеев, Э. М. Прасолов, Г. П. Дворник, В. И. Леонтьев // Региональная геология и металлогения. — 2019. — № 77. — С. 75–97.
28. Шербань И. П. Условия образования низкотемпературных околорудных метасоматитов (на примере Алтае-Саянской области). — Новосибирск: Наука, 1975. — 200 с.
29. John D. A. Porphyry copper deposit model / D. A. John, R. A. Ayuso, M. D. Barton, R. J. Blakely, R. J. Bodnar, J. H. Dilles, F. Gray et al. // Scientific Investigations Report 2010-5070-B, U. S. Geological Survey. — Reston, Virginia. — 2010. — 169 p.
30. Lowell J. D., Guilbert J. M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits // *Economic Geology*. — 1970. — Vol. 65, no. 4. — Pp. 373–408.
31. Muller D., Groves D. I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. — Springer International Publishing, the 4th Edition, 2016. — 311 p.
32. Shatov V. V. Petrology and geochemistry of hydrothermal alteration related to the Kuvsky granitic pluton, Central Kazakhstan / Eds.: V. Shatov, R. Seltmann, A. Kremenetsky, B. Lehmann, V. Popov, P. Ermolov // *Granite-related ore deposits of Central Kazakhstan and Adjacent Areas*. — St. Petersburg: Glagol, 1996. — Pp. 315–336.
33. Shatov V. V. Alteration-mineralization model for Cu-Mo porphyry system of the Bozshakol deposit, Central Kazakhstan / Eds.: C. J. Stanley et al. // *Mineral deposits: processes to processing*. — Rotterdam: A. A. Balkema, 1999. — Vol. 1. — Pp. 437–440.
34. Shatov V. V., Moon C. J., Seltmann R. Discrimination between volcanic associated massive sulphide and porphyry mineralization using a combination of quantitative petrographic and rock geochemical data: A case study from the Yubileinoe Cu-Au deposit, western Kazakhstan // *Journal of Geochemical Exploration*. — 2014. — Vol. 147, pt. A. — Pp. 26–36.
35. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems // *Economic Geology*. — 2010. — Vol. 105. — Pp. 3–45.
36. Sinclair W. D. Porphyry deposits / Ed.: W. D. Goodfellow // *Mineral deposits of Canada*. — Geological Association of Canada, Special Publication, 2007. — No. 5. — Pp. 223–243.
-
1. Veltuzhskikh V. G., Kazanskiy V. I., Kochetkov A. Ya., Yanovskiy V. M. Zolotorudnye mestorozhdeniya Tsentral'nogo Aldana [Gold ore deposits of the Central Aldan]. *Geology of Ore Deposits*, 2002, vol. 44, no. 6, pp. 467–499. (In Russian).
2. Grabezhev A. I., Belgorodskiy E. A. Produktivnye granitoidy i metasomatity medno-porfirovyykh mestorozhdeniy (na primere Urala) [Productive granitoids and metasomatites of copper-porphyry deposits (on the example of the Urals)]. Ekaterinburg, Nauka, 1992, 199 p.
3. Dvornik G. P. Seritsit-mikroklinovye metasomatity i zolotoe orudnenie Ryabinovskogo rudnogo polya (Aldanskiy shchit) [Sericit-microcline metasomatites and gold mineralization in Ryabinovsk ore field (Aldan shield)]. *Litosfera*, 2009, no. 2, pp. 56–66. (In Russian).
4. Dvornik G. P. Raspredelenie zolota i serebra v rudnykh telakh Ryabinovogo i Novogo mestorozhdeniy (Aldanskiy shchit) [Gold and silver content distribution in ore bodies of Ryabinovoe and Novoe deposits (Aldanskiy shield)]. *Litosfera*, 2011, no. 4, pp. 119–130. (In Russian).
5. Dvornik G. P. Metasomatizm i zolotoe orudnenie kalievyykh shchelochnykh massivov (na primere Tsentral'no-Aldanskoy shchelochnoy provintsii) [Metasomatism and gold mineralization of potassium alkaline massifs (on the example of the Central Aldan alkaline province)]. Ekaterinburg, Ural'skiy gosudarstvennyy gornyy universitet, 2014, 329 p.
6. Zharikov V. A., Rusinov V. L., Marakushev A. A., Zarayskiy G. P., Omel'yanenko B. I. et al. Metasomatizm i metasomaticheskie porody [Metasomatism and metasomatic rocks]. Moscow, Nauchnyy mir, 1998, 492 p.
7. Zvezdov V. S. Formational environments and forecast criteria for large and giant porphyry copper deposits. *Prospect and Protection of Mineral Resources*, 2019, no. 4 (73), pp. 4–19. (In Russian).
8. Kazitsyn Yu. V. Metasomatizm gidrotermal'nykh mestorozhdeniy [Metasomatism of hydrothermal deposits]. Leningrad, Nedra, 1972, 145 p.
9. Kovalenker V. A., Myznikov I. K., Kochetkov A. Ya., Naumov V. B. Platinonosnoe zoloto-sul'fidnoe orudnenie Ryabinovogo shchelochnogo massiva (Tsentral'nyy Aldan, Rossiya) [PGE-bearing gold-sulphide mineralization of the Ryabinovoy alkaline massif (Central Aldan district, Russia)]. *Geology of Ore Deposits*, 1996, vol. 38, no. 4, pp. 345–356. (In Russian).
10. Korzhinskiy D. S. Petrologiya Tur'inskikh skarnovykh mestorozhdeniy medi [Petrology of the Turinsky skarn copper deposits]. Moscow, 1948, 148 p.
11. Kochetkov A. Ya. O novom tipe medno-porfirovogo orudneniya [On a new type of copper-porphyry mineralization]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1982, vol. 267, no. 2, pp. 430–432. (In Russian).
12. Kochetkov A. Ya. Molibden-medno-zoloto-porfirovoe mestorozhdenie Ryabinovoe [Molybdenum-copper-gold-porphyry Ryabinovoye deposit]. *National Geology*, 1993, no. 7, pp. 50–58. (In Russian).
13. Kochetkov A. Ya. Ore potential of alkaline massifs of the Aldan Shield. Ryabinovsky copper-gold-porphyry deposit.

Russian Journal of Pacific Geology, 2006, vol. 25, no. 1, pp. 62–73. (In Russian).

14. Kochetkov A. Ya., Pakhomov V. N., Popov A. B. Magmatizm i metasomatizm Ryabinovogo rudonosnogo shchelochnogo massiva (Tsentral'nyy Aldan) [Magmatism and metasomatism of the Ryabinovy ore-bearing alkaline massif (Central Aldan)]. *Magmatizm medno-molibdenovykh rudnykh uzlov*. Novosibirsk, Nauka, 1989, pp. 79–110. (In Russian).

15. Marin Yu. B. Granitoidnye formatsii malykh i umerennykh glubin [Granitoid formations of shallow and moderate depths]. Leningrad, Leningradskiy gosudarstvennyy institut, 1976, 143 p.

16. Krivtsov A. I., Zvezdov V. S., Migachev I. F., Minina O. V. Medno-porfirovye mestorozhdeniya [Copper-porphyry deposits]. Moscow, Tsentral'nyy nauchno-issledovatel'skiy geologorazvedochnyy institut tsvetnykh i blagorodnykh metallov, 2010, 232 p.

17. Molchanov A. V., Terekhov A. V., Shatov V. V., Petrov O. V., Kukushkin K. A., Kozlov D. S., Shatova N. V. Gold ore districts and ore clusters of the Aldanian metallogenic province. *Regional Geology and Metallogeny*, 2017, no. 71, pp. 93–111. (In Russian).

18. Pavlova I. G. Medno-porfirovye mestorozhdeniya (Zakonomernosti razmeshcheniya i kriterii prognozirovaniya) [Copper-porphyry deposits (Distribution patterns and forecasting criteria)]. Leningrad, Nedra, 1978, 275 p.

19. Plyushchev E. V., Ushakov O. P., Shatov V. V., Belyaev G. M. Metodika izucheniya gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy [Methods of studying hydrothermal-metasomatic alterations study]. Leningrad, Nedra, 1981, 262 p.

20. Plyushchev E. V., Shatov V. V. Geokhimiya i rudonosnost' gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy [Geochemistry and ore potential of hydrothermal-metasomatic alterations]. Leningrad, Nedra, 1985, 247 p.

21. Plyushchev E. V., Shatov V. V., Kashin S. V. Metallogeniya gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy [Metallogeny of hydrothermal-metasomatic alterations]. St. Petersburg, A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, 2012, 559 p.

22. Popov V. S. Geologiya i genezis medno- i molibden-porfirovykh mestorozhdeniy [Geology and genesis of copper- and molybdenum-porphyry deposits]. Moscow, Nauka, 1977, 204 p.

23. Terekhov A. V., Molchanov A. V., Shatova N. V., Belova V. N. Dva tipa rudonosnykh gumbeytov El'konskogo zoloto-uranovorudnogo uzla (Yuzhnaya Yakutiya) [Two types of ore-bearing gumbeyts of the Elkon gold-uranium ore cluster (South Yakutia)]. *Regional Geology and Metallogeny*, 2014, no. 60, pp. 71–86. (In Russian).

24. Ugryumov A. N., Dvornik G. P. Shchelochnye rudonosnye metasomatity Ryabinovogo massiva (Aldanskiy shchit) [Alkaline ore-bearing metasomatites of the Ryabinovy massif (Aldan shield)]. *Sovetskaya geologiya*, 1984, no. 9, pp. 84–94. (In Russian).

25. Shatov V. V., Molchanov A. V., Shatova N. V., Sergeev S. A., Belova V. N., Terekhov A. V., Rad'kov A. V.,

Solov'ev O. L. Petrografiya, geokhimiya i izotopnoe (U-Pb i Rb-Sr) datirovanie shchelochnykh magmaticheskikh porod Ryabinovogo massiva (Yuzhnaya Yakutiya) [Petrography, geochemistry and isotopic (U-Pb and Rb-Sr) dating of alkaline igneous rocks of the Ryabinovy massif (South Yakutia)]. *Regional Geology and Metallogeny*, 2012, no. 51, pp. 62–78. (In Russian).

26. Shatova N. V., Skublov S. G., Melnik A. E., Shatov V. V., Molchanov A. V., Terekhov A. V., Sergeev S. A. Geochronology of alkaline magmatic rocks and metasomatites of the Ryabinovy stock (South Yakutia) based on zircon isotopic and geochemical (U-Pb, REE) investigations. *Regional Geology and Metallogeny*, 2017, no. 69, pp. 33–48. (In Russian).

27. Shatova N. V., Molchanov A. V., Terekhov A. V., Shatov V. V., Petrov O. V., Sergeev S. A., Prasolov E. M., Dvornik G. P., Leont'ev V. I. Ryabinovoe copper-gold-porphyry deposit (Southern Yakutia): geology, noble gases isotope systematics and isotopic (U-Pb, Rb-Sr, Re-Os) dating of wallrock alteration and ore-forming processes. *Regional Geology and Metallogeny*, 2019, no. 77, pp. 75–97. (In Russian).

28. Shcherban' I. P. Usloviya obrazovaniya nizkotemperaturnykh okolorudnykh metasomatitov (na primere Altae-Sayanskoy oblasti) [Formation conditions of low-temperature wall-rock metasomatites (on the example of the Altai-Sayan region)]. Novosibirsk, Nauka, 1975, 200 p.

29. John D. A., Ayuso R. A., Barton M. D., Blakely R. J., Bodnar R. J., Dilles J. H., Gray F. et al. Porphyry copper deposit model. *Scientific Investigations Report 2010-5070-B*, U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2010, 169 p.

30. Lowell J. D., Guilbert J. M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 1970, vol. 65, no. 4, pp. 373–408.

31. Muller D., Groves D. I. *Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization*. Springer International Publishing, the 4th Edition, 2016, 311 p.

32. Shatov V. V. Petrology and geochemistry of hydrothermal alteration related to the Kuvsky granitic pluton, Central Kazakhstan. In Shatov, V., Seltmann, R., Kremenetsky, A., Lehmann, B., Popov, V., Ermolov, P. (eds.): *Granite-related ore deposits of Central Kazakhstan and Adjacent Areas*, St. Petersburg, Glagol, 1996, pp. 315–336.

33. Shatov V. V. Alteration-mineralization model for Cu-Mo porphyry system of the Bozshakol deposit, Central Kazakhstan. In Stanley, C. J. et al. (eds.): *Mineral deposits: processes to processing*, Rotterdam, A. A. Balkema, 1999, vol. 1, pp. 437–440.

34. Shatov V. V., Moon C. J., Seltmann R. Discrimination between volcanic associated massive sulphide and porphyry mineralization using a combination of quantitative petrographic and rock geochemical data: A case study from the Yubileinoe Cu-Au deposit, western Kazakhstan. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 147, pt. A, pp. 26–36.

35. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 2010, vol. 105, pp. 3–45.

36. Sinclair W. D. Porphyry deposits. In Goodfellow, W. D. (ed.): *Mineral deposits of Canada*, Geological Association of Canada, Special Publication, 2007, no. 5, pp. 223–243.

Шатова Надежда Витальевна – канд. геол.-минерал. наук, вед. инженер, ВСЕГЕИ¹. <narlin.ros@mail.ru>

Шатов Виталий Витальевич – канд. геол.-минерал. наук, вед. специалист, ВСЕГЕИ¹. <vitaly_shatov@vsegei.ru>

Молчанов Анатолий Васильевич – доктор геол.-минерал. наук, директор, Центр прогнозно-металлогенических исследований ВСЕГЕИ¹. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Петров Олег Владимирович – чл.-корр. РАН, доктор геол.-минерал. наук, доктор экон. наук, ген. директор, ВСЕГЕИ¹. <vsegei@vsegei.ru>

Терехов Артём Валерьевич – канд. геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ¹. <artem_terekhov@vsegei.ru>

Белова Валентина Николаевна – ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <valentina_belova@vsegei.ru>

Леонтьев Василий Иванович – канд. геол.-минерал. наук, вед. геолог, ВСЕГЕИ¹. <vasily_leontiev@vsegei.ru>

Shatova Nadezhda Vital'evna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Engineer, VSEGEI¹.
<narlin.ros@mail.ru>

Shatov Vitaliy Vital'evich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Expert, VSEGEI¹.
<vitally_shatov@vsegei.ru>

Molchanov Anatoliy Vasil'evich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Director of the Center, Centre of Predictive Metallogenic Studies of VSEGEI¹. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Petrov Oleg Vladimirovich – Corresponding Member of RAS, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Doctor Economic Sciences, Director General, VSEGEI¹. <vsegei@vsegei.ru>

Terekhov Artem Valer'evich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI¹.
<artem_terekhov@vsegei.ru>

Belova Valentina Nikolaevna – Senior Researcher, VSEGEI¹. <valentina_belova@vsegei.ru>

Leont'ev Vasiliy Ivanovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Geologist, VSEGEI¹.
<vasily_leontiev@vsegei.ru>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia.