

СТАТЬИ

УДК 553.48:549.3

**МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
МЕТАСОМАТИЧЕСКИ ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД  
ЮГО-ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА ИНТРУЗИВА КУВАЛОРОГ (КАМЧАТКА)**

**Кунгурова В.Е.**

*Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения  
Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, e-mail: kunwe@yandex.ru*

В пределах юго-восточного фланга интрузивного массива Кувалорог выполнены исследования зон измененных пород, которые простираются в северо-восточном направлении и охватывают верховья р. Правыхихчинская и р. Перевозная. В статье дана минералого-петрографическая характеристика метаморфогенно-метасоматических образований из этих тектонически ослабленных зон и рассмотрены возможности их рудоносности. Изучение измененных пород, в том числе в зонах тектонических нарушений, весьма актуально, поскольку одной из важнейших задач при формировании медно-никелевого оруденения является выявление пост(мета)магматических преобразований пород, руд и особенностей перераспределения рудного вещества на заключительной стадии рудно-магматического процесса. Метасоматически измененные породы наряду с такими новообразованными минералами, как биотит, пироксен, кварц, гранат, графит, содержат мелкую рассеянную вкрапленность сульфидов. Ранее накопленный материал по сульфидным медно-никелевым объектам Камчатской никеленосной провинции, анализ выявленных в ходе проведенных исследований особенностей строения метасоматических зональных комплексов, распределение и взаимоотношение рудных минералов в породах, установленные парагенетические минеральные ассоциации позволяют сделать вывод о том, что процесс рудообразования имел сложный многоэтапный характер. На раннем собственно магматическом этапе происходило развитие сингенетичной вкрапленности магнетита и пирротина. В пост-магматический этап мог происходить перенос значительной массы рудного вещества в составе высокотемпературных флюидов, действующих в зонах повышенной проницаемости, приуроченных к долгоживущим разломам и связывающих магматические камеры с гипабиссальными горизонтами земной коры. Происходящие в этих камерах процессы дифференциации приводили к развитию комплекса магм, последовательное внедрение которых вызывало образование контактово-метасоматических образований.

**Ключевые слова:** интрузив Кувалорог, зональные комплексы, тальк-хлоритовые породы, полевошпат-кварцевые метасоматиты, контактово-метасоматические образования

**PETROGRAPHICAL AND MINERALOGICAL CHARACTERISTICS  
OF METASOMATICALLY ALTERED ROCKS OF KUVALOROG  
INTRUSION SOUTHEASTERN FLANK (KAMCHATKA)**

**Kungurova V.E.**

*Research Geotechnological Center of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatskiy, e-mail: kunwe@yandex.ru*

The Kuvallorog intrusion altered rocks zones, which extend northeastward and cover the headwaters of the Pravokikhchinskaya and Perevoznaya rivers, are investigated. The article gives mineralogical and petrographical characteristics of metamorphogenic and metasomatic formations of these tectonically weakened zones and considers their ore-bearing capacity. The study of altered rocks, including those in fault zones, is highly relevant, since one of the most important tasks in the course of the formation of copper-nickel mineralisation is the revealing of post-(meta) magmatic transformations of rocks, ores and features of redistribution of ore matter at the ore formation magmatic process final stage. Metasomatically altered rocks along with such newly formed minerals as biotite, pyroxene, quartz, garnet, and graphite contain small scattered phenocrysts of sulphides. The previously obtained data on copper-nickel sulphide deposits of the Kamchatka nickel-bearing province, the analysis of metasomatic zonal complexes structural features, as well as distribution and relationship of ore minerals in rocks, and established paragenetic mineral associations allow us to conclude that ore formation has been a complicated process. In the magmatic cycle early stage, the development of magnetite and pyrrhotite syngenetic phenocrysts took place. In the post-magmatic stage, a significant amount of ore material may have been transported as part of high-temperature fluids in high permeability zones confined to preexistent faults and linking magma chambers with hypabyssal bedding rocks of the Earth's crust. Differentiation processes taking place in these chambers led to the development of a complex of magmas, the successive introduction of which caused the generation of contact-metasomatic formations.

**Keywords:** Kuvallorog intrusion, zonal complexes, talc-chlorite rocks, quartz-feldspar metasomatites, contact-metasomatic formations

В конце 1960-х гг. в южной части Срединного хребта Центральной Камчатки были выявлены интрузивные массивы дукукского габбро-норит-кортландитового комплекса пород (Кувалорог, Дукук, Пеницкий, Немтикский, Кагнисинский и др.), несущие медно-никелевую минерализацию.

Одним из наиболее перспективных на выявление промышленных медно-никелевых объектов является интрузивный массив Кувалорог, расположенный на периклинальном замыкании антиклинальной структуры Срединного хребта. В статье приведено краткое описание его

геологического строения; более подробно оно изложено в ряде публикаций [1, 2]. Массив залегает в сложнодислоцированной толще хейванской свиты мелового возраста, представленной метапесчаниками, углистыми и карбонатными филлитами. Породы хейванской свиты прорваны интрузивными образованиями позднемелового плагиогранит-гранодиоритового кольского комплекса (раннеэоценового по [3]), позднемелового кортландит-ортопироксенит-габброноритового дукукского комплекса (позднепалеоцен-раннеэоценового по [4]), неогенового гранодиоритового лавкинско-го (рис. 1). Контакты дукукской интрузии с вмещающими породами сопровождаются кварцевыми прожилками, ороговикованием вмещающих пород.

Самый большой по размерам из всех в пределах Камчатской никеленосной провинции интрузив Кувалорог приурочен к зоне влияния Квинум-Степановского разлома [2, 5]. Основную массу пород массива составляют роговообманковое габбро (~50%), в разной степени окварцованное, биотитизированное; лейкократовые нориты (~30%), нередко амфиболизированные до образования горнблендитов, биотитизированные; в меньшем количестве встречены кортландиты и меланократовые нориты, оливинные нориты. Для пород дукукского комплекса в целом характерна повсеместная, хотя и разной интенсивности, амфиболизация, затушевывающая их первичный состав. Гидротермальные изменения, связанные с интрузиями дукукского комплекса, проявлены зонами окварцевания, кварцевыми, кварц-карбонатными, кварц-полевошпатовыми прожилками, часто с сульфидной медно-никелевой минерализацией. В эндоконтактной зоне (мощностью ~100–300 м) породы явно контаминированы, внешне осветлены, гранатизированы, содержат ксенолиты мигматизированных сланцев хейванской свиты, количество которых возрастает по мере приближения к непосредственному контакту интрузии с филлитовидными сланцами. В левом борту р. Правокихчинский, вблизи района исследований, контаминированные породы проявлены преимущественно в области экзоконтакта, в контактово-измененных (ороговикованных до гнейсов и мигматитов) сланцах хейванской свиты. Они в виде прожилков, жил пронизывают вмещающие породы на расстоянии > 1 км. Эта зона контактовых преобразований ранее включалась в состав интрузии, поскольку

количество инъекционного магматического материала сопоставимо с объемом вмещающих пород.

Интрузив разбит на отдельные блоки, границами которых являются зоны дробления разломов различных направлений. Амплитуда смещения блоков относительно друг друга колеблется от сантиметров до десятков метров. Породы на этих участках интенсивно изменены, что выражается в окварцевании, биотитизации, актинолитизации, графитизации.

В НИГТЦ ДВО РАН были проведены полевые исследования на юго-восточном фланге интрузивного массива Кувалорог. В результате комплекса геофизических работ, проведенных сотрудниками ОАО «Камчатгеология» в 1979–1982 гг., здесь была закартирована комплексная аномалия импеданса (пониженных сопротивлений) и переходных процессов суммарной шириной 500–700 м и протяженностью 6,5 км, прослеживаемая в северо-восточном направлении. Она компенсируется с аномалией силы тяжести и положительным магнитным полем и, по мнению исследователей (Б.М. Дзюба, И.В. Евтихов, В.Н. Лукьянов), имеет рудную природу; причем на юго-западном окончании (проявление Рассоха) контролирует залежь массивных руд, а на северо-восточном – зону вкрапленного оруденения (проявление Кувалорог) (рис. 1). Руды проявления Рассоха содержат: Ni – 1,2–3,97%, Co – 0,056–0,19%, Cu – 0,36–1,2%, Au – 0,032–0,14 г/т, Pt – до 0,3 г/т, Pd – до 0,5 г/т, Rh до 0,2, Ru – до 0,15; в окисленных рудах проявления Кувалорог: Ni – до 0,15%, Co – 0,008%, Cu – 0,32%, Au – до 2 г/т,  $\Sigma$ Pt-дов – до 4,7 г/т [6]. На юго-восточном фланге в бассейне р. Правокихчинская с целью обнаружения сульфидных руд были пробурены вертикальные скважины глубиной 44 и 83 м соответственно (рис. 1). Были вскрыты графитизированные габбродиориты с вкрапленностью сульфидов до 20%, что предопределило на карте появление рудопроявления Правокихчинское, хотя максимальные содержания металлов в метасоматически измененных породах составили: никель – 0,015%, кобальт – 0,007%, медь – 0,04%.

Перечисленные выше, а также другие выявленные проявления и пункты сульфидной медно-никелевой минерализации интрузива Кувалорог локализуются, как правило, в участках повышенной проницаемости в пределах тектонических зон, сформировавшихся при активизации глубинных

разломов северо-западного и северо-восточного простираний. На них накладываются разломы субширотного простирания. В узлах пересечения субширотных разломов с разломами других направлений и локализуются рудопоявления южного сектора массива Кувалорог (проявления Рассоха, Кувалорог). На местности они выделяются локальными понижениями с ложбинами разных направлений. Нахождение инъекционного материала глубинного происхождения (в том числе рудного) на таких участках разуплотнения пород рамы вполне закономерно.

Цель исследования – изучение возможности рудоносности метасоматически преобразованных пород. Наряду с такими новообразованными минералами, как биотит, пироксен, кварц, гранат, графит, метасоматиты содержат мелкую рассеянную вкрапленность сульфидов. Содержание в них цветных металлов по единичным результатам опробования предшественников составляло сотые доли %. Возможно, что минерализованные породы не всегда выведены на поверхность. В статье дана их минералого-петрографическая характеристика. Исследуемые линейно-вытянутые в северо-восточном направлении от проявлений Рассоха – Правокихчинское зоны метасоматически измененных пород прослеживаются до проявления Кувалорог и рассматриваются как структуры потенциально перспективные для локализации в них эпигенетических сульфидных руд инъекционного типа, о чем свидетельствует парагенетическая связь наиболее богатых сульфидных руд Кувалорогского интрузива с габброидами, претерпевшими в постмагматический этап автометасоматические преобразования.

#### **Материалы и методы исследования**

Объектом исследований являлись зоны измененных пород на юго-восточном фланге массива Кувалорог, простирающиеся в северо-восточном направлении, охватывающие бассейн руч. Рассоха, верховья р. Правокихчинская и Перевозная и прослеживающиеся по простиранию на расстояние 3,5 км. На юго-западе эта зона пересечена системой субширотных разрывов, и здесь расположено сульфидное медно-никелевое рудопоявление Рассоха, а на северо-востоке – рудопоявление Кувалорог (рис. 1).

Многочисленные тектонические нарушения зоны мощностью от первых метров до 25–30 м сопровождаются дробленными

и метасоматически измененными породами. Нами был исследован ряд линейных тектонических зон со следующими видимыми метасоматическими новообразованиями: окварцевание, гранатизация, биотитизация, пироксенитизация, амфиболитизация. Породы часто лимонитизированы, графитизированы, с сульфидной вкрапленностью, рассечены кварцевыми жилами и прожилками.

Проведены маршрутные геолого-поисковые наблюдения. Осуществлялось подробное описание и опробование измененных пород, петрологические и геохимические исследования, с акцентом на возможное установление их рудонесущей роли. Исследования осуществлялись с учетом данных, полученных предшественниками.

Основной минералого-петрографических исследований послужили просмотр минералов под биноклем и микроскопические наблюдения в шлифах в проходящем свете, при которых определялся минеральный состав пород, выяснялись их структурно-текстурные особенности. Образцы пород проанализированы в лабораториях ПГО «Камчатгеология», ИВиС ДВО РАН, ФГУП ИМГРЭ, определен химический состав, проведен спектральный полуколичественный анализ, атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

В левом борту в верховьях р. Правокихчинская (т.н. 282, рис. 2) зафиксирована одна из зон измененных пород, имеющая мощность около 60 м, простирание 30°, которая уходит на правый берег (т.н. 219). Падение зоны на северо-запад под углом 65–70°.

Вмещающими породами являются массивные светло-серые биотит-роговообманковые габбродиориты (обр. Р-282, рис. 3, а). В выветрелом состоянии они приобретают скорлуповатую отдельность. Текстура породы неравномерная, структура среднезернистая. Наблюдается слабое изменение, заключающееся в частичном замещении амфибола биотитом и хризотилом, андезитом – альбитом.

Постепенно при продвижении к центральной части зоны габбродиориты теряют свой первоначальный облик за счет окварцевания и замещения темноцветных минералов вторичными. Они сменяются (вкрясть простирания) хлоритизированными биотит-амфиболовыми габбродиоритами (обр. 282А, рис. 3, б).

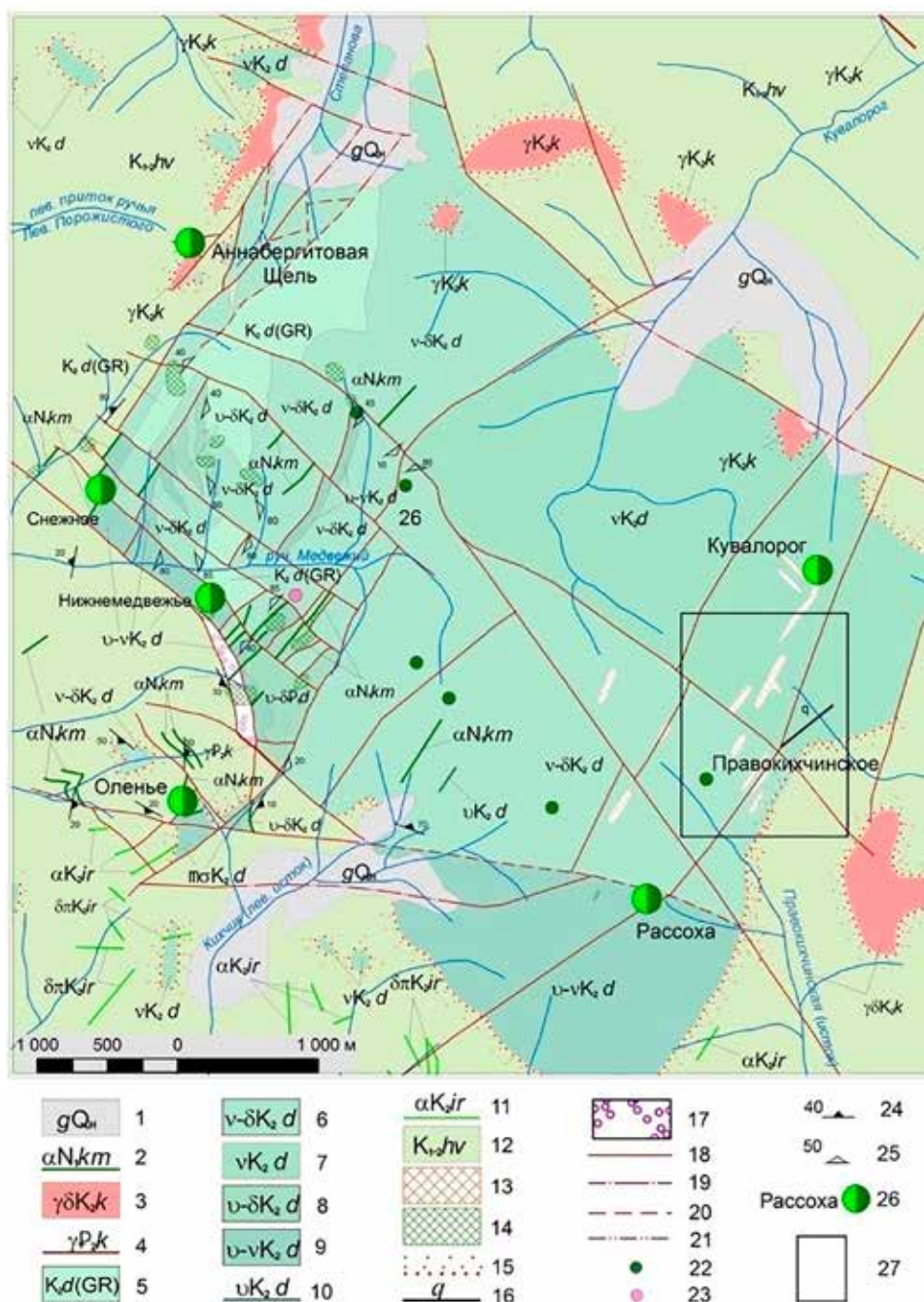


Рис. 1. Схематическая геологическая карта массива Кувалорог [1]:

1 – ледниковые отложения (голоцен), 2 – дайки андезитов кимитинского комплекса. Интрузии (3) и дайки (4) кольского комплекса: гранодиоритов, диоритов (д), плагиогранитов и гранитов (γ). Фациальные разности интрузий дукусского комплекса сложного состава (5–10): 5 – гранатовые диориты, 6 – нориты и диориты, 7 – габбро и габбронориты, 8 – горнблендиты и диориты, 9 – ортопироксениты и габбро, метапериодиты, 10 – субпластовые тела пироксенитов, не выражающиеся в масштабе карты, 11 – ирунейские субвулканические образования – субпластовые тела андезитов (α) и диоритовых порфиритов (δπ), 12 – сланцы хейванской свиты, 13 – метасоматиты, 14 – вкрапленная сульфидная минерализация, 15 – контактово-измененные породы, 16 – жилы кварца, 17 – зоны полимиктового меланжа. Разрывные нарушения (18–21): 18 – достоверные, 19 – достоверные, скрытые под вышележащими образованиями, 20 – предполагаемые, 21 – предполагаемые, скрытые под вышележащими образованиями. 22 – медно-никелевые рудопроявления и их названия, 23 – медно-никелевые пункты минерализации, 24 – безникелевая пирротиновая минерализация в ксенолите сланца, 25, 26 – элементы наклонного залегания: сланцеватости (25), расслоенности интрузии (26); участок исследований (27)



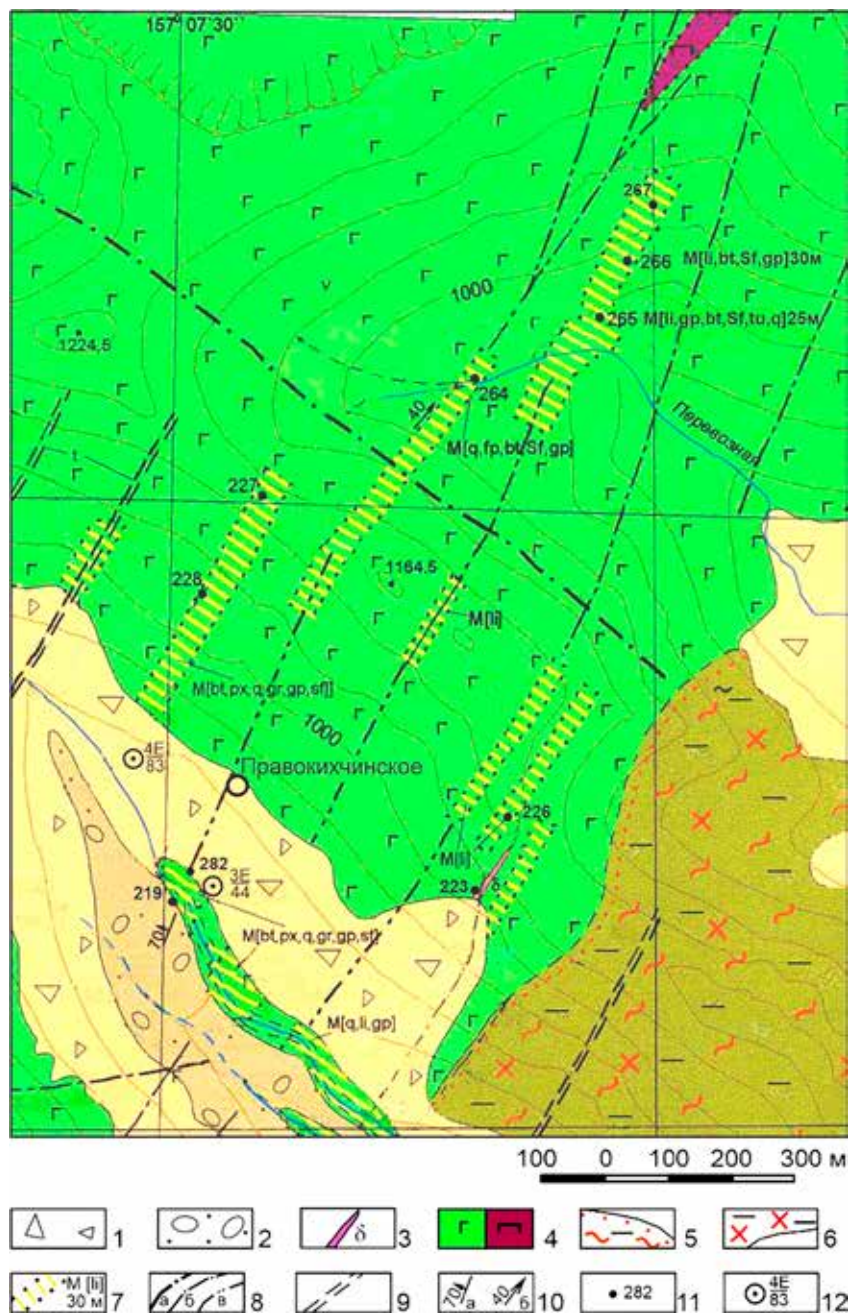


Рис. 2. Схематическая геологическая карта юго-восточной части интрузива Кувалорог (составлена на геологической основе Г.В. Кувакина, с дополнениями и изменениями автора):

1 – элювиально-делювиальные, коллювиальные отложения ( $Q_{II}$ ), 2 – ледниковые валуны, пески, супеси, суглинки ( $Q_{III}$ ), 3 – дайки миоценовых диоритов и диоритовых порфиров ( $\delta$ ), 4 – амфиболитизированные перидотиты ( $\delta\sigma$ ), габбро, габбродиориты, габбронориты неразделенные ( $\nu$ ) дукусского комплекса, 5–6 – породы контактового метаморфизма: приконтактные роговики, мигматизированные гнейсы и биотит-гранатовые кристаллические сланцы (5), участки распространения (до 50% и более) тел, жил и прожилков контаминированных диоритов и гранодиоритов, гранатизированных, биотитизированных (6), 7 – приразломные метасоматиты: зоны метасоматически измененных пород (M) с указанием мощности (30 м) и преобладающих в них минералов (px – пироксены, bt – биотит, gr – гранат, q – кварц, tu – турмалин, gf – графит, li – лимонит, sf – сульфиды, sr – полевые шпаты, tc – гидрослюда, a – амфиболы, ca – карбонаты), 8 – разрывные нарушения: установленные геолого-геофизическими методами главные (а), второстепенные (б), выраженные в современном рельефе в виде ложбин и рвов (в), 9 – тектонические зоны (t) предполагаемые, 10 – угол падения контактов (а), азимут простирания (б), 10 – пункты геологических наблюдений, 11 – скважины, их номера (в числителе), глубина (в знаменателе)



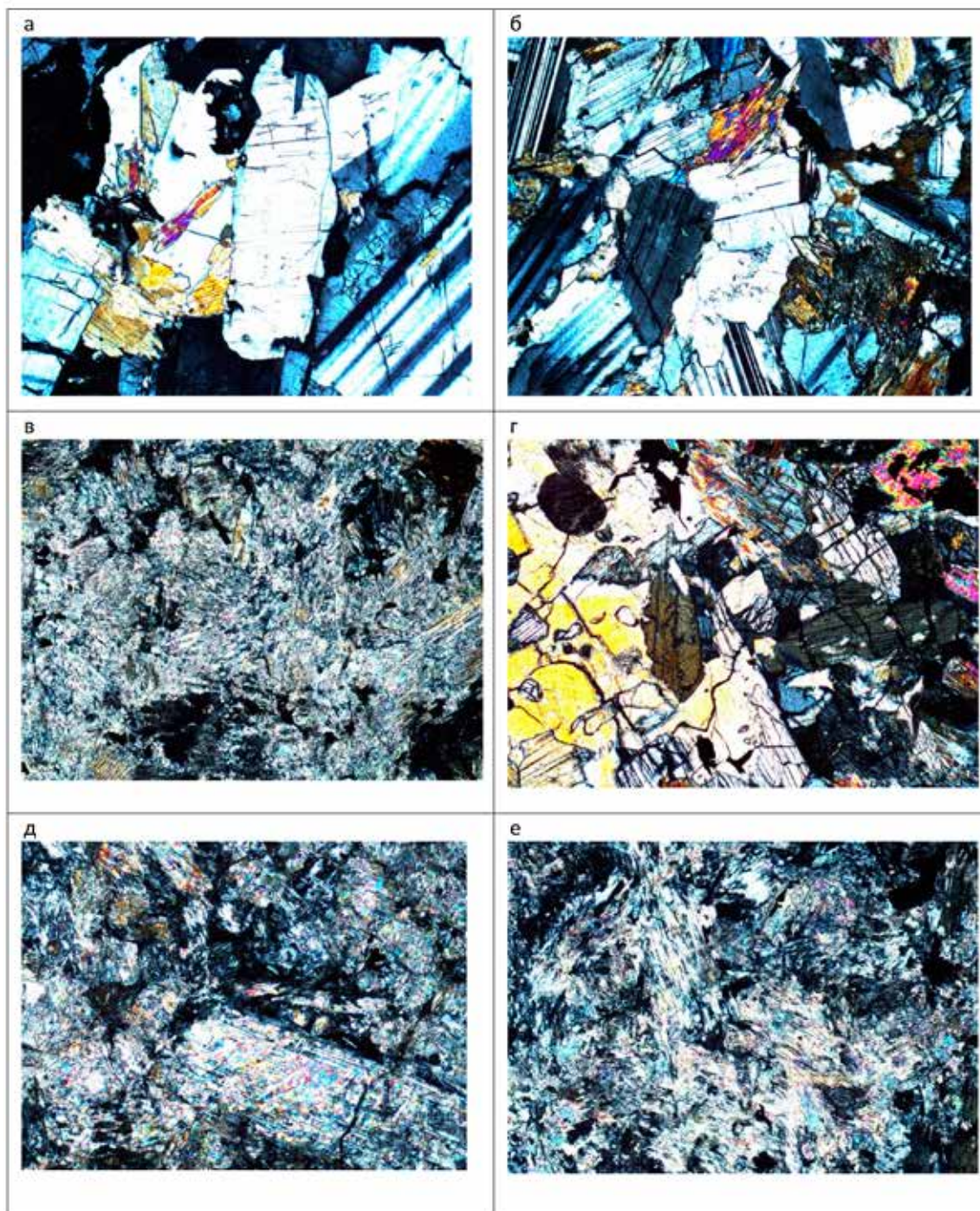


Рис. 3. Шлифы из зоны измененных пород (юго-восточный фланг интрузива Кувалорог), в скрещенных николях: а – роговообманковый габбродиорит (обр. 282), б – хлоритизированный биотит-амфиболовый габбродиорит (обр. 282А), в – хлорит-тальковая порода (обр. 282Б), г – пироксен-амфиболовая измененная порода (обр. 282В), д – хлорит-тальковая порода (обр. 282Д), е – тальк-хлоритовая порода (обр. 282Е)

Мощность этой зоны ~ 15 м. Текстура породы пятнистая, структура крупнозернистая. Пятнистость обусловлена скоплением зерен роговой обманки (35–40% от объема породы), представленной удлиненными

призматическими формами со слабо выраженным плеохроизмом. Отмечается развитие псевдоморфоз хлорита по амфиболу. Короткостолбчатые кристаллы лабрадора (№ 57–58) достигают размера до 2 мм, со-

держание его в породе составляет 50–55%; в пустотах и трещинах зерен встречены гидрослюда, серицит, кварц, соссюрит, эпидот, хлорит. Биотит (5%) представлен двумя генерациями: вторичным по амфиболу, развитым совместно с хлоритом и эпидотом, и первичными идиоморфными чешуями. Кварц (1–3%) заполняет интерстиции между зернами плагиоклаза. Рудные минералы составляют < 1. Это ксеноморфные зерна пирротина, реже халькопирита. Наблюдается приуроченность выделений рудных к участкам замещения амфибола биотитом, хлоритом. Текстура рудной массы неравномерно вкрапленная, структура эмульсионно-сидеронитовая. В этой зоне в результате слабопроявленного метасоматического преобразования возник комплекс новообразованных минералов, свойственный пропилитам: хлорит, эпидот, кварц [7]. Вероятно, что с этим процессом связано отложение части сульфидов.

Далее следует зона зеленовато-серых пород мощностью до 10–12 м, сложенная породой пепловидного облика. Это хлорит-талъковая порода, развитая по магматической амфибол-пироксенсодержащей магматической породе. По трещинам развиты лимонитизация и омарганцевание.

В этой зоне встречены участки мощностью до 3–4 м интенсивного разложения до состояния дресвы породы терракотово-светло-коричневого цвета с многочисленными зонками (до 1–2 см) графита. Порода состоит из талька (40%), представляющего собой ксеноморфные чешуйчато-пластинчатые различно ориентированные агрегаты; хлорита (30%) в виде новообразованных кустистых агрегатов, развитых самостоятельно или в ассоциации с тальком; и полуразрушенных выделений амфибола (20%), интенсивно замещенных тальком, хлоритом и частично – пятнами глинистых минералов (обр. Р 282 Б, рис. 3, в). Присутствуют единичные полуразрушенные крупные кристаллы энстатита с пятнами тальк-хлоритового или талькового агрегата; изредка в качестве вторичных установлен эпидот. Структура породы – лепидобластовая.

Вероятно, исходным минералом для новообразованного талька являлся энстатит, а для хлорита – амфибол и энстатит. Замещение пироксенов тальком происходит под влиянием кислых гидротермальных растворов, очевидно связанных с внедряющимися интрузиями гранитоидов. При этом на раннем этапе происходило образование амфибол-пироксеновых пород. Рудные (1–2%)

представлены ксеноморфными зернами пирротина и халькопирита в форме гнезд и отдельных прожилков, единичными выделениями пентландита. Среди вкрапленников рудных преобладает пирротин (85%). Зерна рудных не превышают 0,05 мм. В породе наблюдаются прожилки и колломорфные массы гетита.

Далее расположена зона развития пироксен-амфиболовых пород (центральная зона) с порфиробластовой структурой (обр. Р 282 В, рис. 3, г). Это самая большая по мощности зона – до 20 м. В породе преобладают амфиболы, представленные роговой обманкой (15%) в виде ксеноморфных выделений с совершенной спайностью, а также округленных зерен гастингсита (30%). Ромбические пироксены (энстатит – 15% и гиперстен – 10%) содержат округленные включения амфиболов. Полевые шпаты (олигоклаз № 30–31 (10%), ортоклаз (10%) и микроклин (1%)) содержат включения темноцветных минералов и практически не изменены. Биотит (1–2%) представлен ксеноморфными выделениями; в нем наблюдаются округлые зерна амфибола и рудных минералов. Присутствует графит в виде вкрапленников. Содержание рудных в зоне достигает 5% и представлено равномерной вкрапленностью зерен пирротина неправильной формы размером 0,0 n – 0,5 мм. Иногда они изометричны, но большинство ксеноморфны. Некоторые из этих выделений находятся в сростании с ксеноморфными образованиями халькопирита. Единично в зернах пирротина наблюдаются пластинки пентландита. Иногда вокруг пирротина наблюдаются оторочки и прожилки гетита. Данная порода может являться контактово-метасоматическим образованием, и большая часть сульфидных выделений может быть генетически связана с этим процессом.

Описанные выше породы сменяются зоной хлорит-талъковых пород (обр. 282Д, рис. 3, е). Текстура пятнистая, структура лепидобластовая, порфиробластовая. На 50% породы состоят из волокнистых и чешуйчатых агрегатов талька (50%), развитых по амфиболу и пироксену. Волокнисто-кустистые агрегаты хлорита (35%) также развиты по первично-измененным амфибол-пироксеновым образованиям. В ассоциации с тальком и хлоритом наблюдаются удлиненные выделения карбоната; энстатит (5–10%) представлен полуразрушенными крупнотаблитчатыми кристаллами; амфибол (5–10%) (роговая обманка) – рудимен-

тами волокнистого строения. Выделения рудных минералов приурочены к кристаллам разрушаемых темноцветных минералов, локализуясь в оторочке вокруг этих кристаллов и в трещинках внутри них. Присутствует графит. Содержание рудных составляет 3–4%, представлены равномерной вкрапленностью ксеноморфных и изометричных зерен пирротина с редкими выделениями халькопирита. Местами наблюдаются гнезда более крупных (до 0,3 мм) ксеноморфных, скелетных и параллельно-пластинчатых выделений пирротина. Встречены редкие прожилки гетита, пересекающие отдельные зерна пирротина. В центре зоны среди хлорит-талковых пород наблюдался участок (до 2 м) интенсивной графитизации. Отмечены горизонтально и вертикально ориентированные зонки-прожилки мощностью 3–7 см и гнезда 2x5 см, состоящие из графита. В целом материал зоны представлен рыжевато-охристыми интенсивно измененными лимонитизированными породами, превращенными в дресву.

Хлорит-талковая порода сменяется тальк-хлоритовой (Р-282Е, рис. 3, е), состоящей на 50% из новообразованного хлорита. Содержание талька достигает 35%. В породе наблюдаются единичные рудименты чешуек биотита, практически нацело замещенных хлоритом. Выделения рудных минералов составляют ~5%. Они пространственно связаны с остатками амфиболов, часто заполняя выщелоченное пространство. На фоне равномерной вкрапленности мелких (0,0 н мм) изометричных и неправильных зерен пирротина наблюдаются более крупные (до 2 мм) ксеноморфные и скелетные выделения пирротина с интенсивной вкрапленностью халькопирита (в отдельных выделениях пирротина до 40% халькопирита). В целом содержание халькопирита составляет 10–15% от количества пирротина. В отдельных зернах пирротина наблюдаются редкие пламеневидные выделения пентландита.

В табл. 1, 2 приведены данные элементного состава проб по результатам количественного спектрального анализа, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, а также результаты макрокомпонентного состава проб.

По химическому составу, содержанию элементов среди измененных пород выделяются тальк-хлоритовые, хлорит-талковые (обр. 282Б, 282Д, 282Е), пироксен-амфиболовые породы (обр. 282В, а также описанные ниже обр. 265-1, 266А). В отличие

от мало затронутых вторичными изменениями биотит-амфиболовых габбродиоритов (обр. 282, 282А), в них отмечены повышенные концентрации MgO (19,78–26,37%),  $FeO_{общ}$ , Cr, V, Mn, Zn (табл. 1, 2), пониженные  $Al_2O_3$ , CaO,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ . Количество рудных элементов (Ni, Cu, Co) в измененных разновидностях в 3–6 раз превышает таковые в исходных габбродиоритах. В пироксен-амфиболовых породах отмечены содержания палладия до 0,484 г/т.

Далее зона перекрыта крупноглыбовыми элювиально-делювиальными образованиями, представленными в основном хлоритизированными биотит-амфиболовыми габбродиоритами.

Таким образом, в результате исследований измененных пород в зоне тектонического нарушения (т.н. 282) выявлено, что в центральной ее части (обр. 282В) образовались амфибол-пироксеновые породы. Этот процесс сопровождался развитием вкрапленности рудных минералов по темноцветам. В дальнейшем (обр. 282Д, 282Е, рис. 3), в результате автометаморфических преобразований происходило развитие биотита, а при действии поздних гидротермальных растворов осуществлялось оталькование. Образование хлорита, эпидота, кварца и карбоната происходило в стадию преобразования как исходных биотит-роговообманковых габбродиоритов, так и амфибол-пироксеновых пород. Ремобилизованное в ходе этого процесса рудное вещество могло участвовать в гидротермальном процессе с последующим отложением сульфидов.

Зона измененных пород прослеживается далее по простиранию на юго-запад, на правобережье р. Правокихчинская (т.н. 219, рис. 2), где обнажаются (5x10 м) биотитовые диориты. Этот выход имеет простирание 30°. Порода пронизана системой кварцевых жил мощностью 2–15 см, имеющих простирание 160°. Биотитовый диорит имеет следующий состав: андезин № 37–38 (50%), биотит (25–30%), ромбический пироксен (5–10%), ортоклаз (5%), роговая обманка (2–3%), альбит (2%), гранат (1–2%). Содержание рудных менее 1%.

Вокруг кварцевых жил установлены маломощные зоны плагиогранитов, сложенные в основном олигоклазом № 30–32 (50%), представленным округленно-таблитчатыми выделениями, которые интенсивно сосюритизированы и серицитизированы. Присутствует кварц (20%) в виде ксеноморфных зерен свежего облика, насыщенный газовой-жидкими включениями.



Таблица 1

Макрокомпонентный и микроэлементный состав пород (мас. %)

Виды анализов, аналитические центры	Химические элементы, окислы	Номер пробы							
		282	282А	282Б	282В	219	219Б	219В	219Г
Содержания элементов (ppm) (АЭС-ИСП, ДВФУ)	Cu	25,8	33,1	147,0	108,8	14,4	5,41	28,05	10,6
	Ni	42,2	45,5	161,0	59,06	14,7	23,8	25,6	10,3
	Co	18,8	26,2	58,6	334,0	29,3	8,37	10,1	22,4
	Ag	0,184	< 0,03	0,182	0,052	0,064	< 0,03	< 0,03	0,071
	Au	0,068	0,057	< 0,01	0,074	0,385	0,141	0,153	< 0,01
	Pt	0,062	0,081	0,048	0,02	0,049	0,127	0,134	0,061
	Pd	0,034	0,058	< 0,01	0,484	< 0,01	0,055	0,064	< 0,01
	Pb	9,72	9,25	9,85	31,4	15,4	22,14	31,4	12,8
	Zn	48,3	44,6	103,0	212,0	242,0	46,5	82,7	142,0
	Cr	239,0	154,0	886,0	229,0	102,0	813,0	849,0	115,0
	V	76,9	105,0	241,0	1953	677,0	65,01	108,0	404,0
	Mn	534,0	670,0	1465	3928	619,0	395,0	499,0	1155
	Mo	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
	Y	7,85	5,82	8,78	7,89	9,91	15,4	23,5	37,5
	Yb	0,71	0,775	1,35	2,37	2,05	1,29	1,88	4,41
	Sc	12,3	15,9	29,8	259,0	35,1	10,06	13,9	60,7
	Zr	22,2	24,3	30,4	58,4	131,0	246,0	235,0	415,0
	Sr	410,0	495,0	50,1	102,0	1008	324,0	505,0	817,0
	Ba	259,0	2266	102,0	5,57	52,7	625,0	2280	60,2
	Be	0,57	0,55	0,776	< 0,1	< 0,1	0,415	0,645	< 0,1
Ga	6,06	6,52	7,82	20,3	49,3	11,7	10,04	29,9	
Макрокомпонентный состав (мас. %) (ИВиС ДВО РАН)	SiO <sub>2</sub>	52,8	49,2	53,8	45,9	56,3	74,1	36,7	73,5
	TiO <sub>2</sub>	0,3	0,24	0,33	0,38	1,0	0,48	0,53	0,47
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,33	21,15	6,64	6,36	20,5	12,97	16,24	13,31
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9	1,48	0,65	2,56	2,55	0,91	1/73	0,6
	FeO	4,53	4,7	9,02	10,62	4,81	3,03	4,06	3,73
	MnO	0,07	0,1	0,17	0,2	0,04	0,05	0,06	0,06
	MgO	5,59	8,77	19,78	26,37	3,65	1,28	2,3	1,46
	CaO	8,32	8,5	2,24	3,01	3,59	1,01	5,05	1,43
	Na <sub>2</sub> O	2,83	2,16	0,58	0,72	3,2	3,19	2,98	2,98
	K <sub>2</sub> O	0,69	0,52	0,22	0,33	2,12	1,34	1,14	0,97
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	н/о	0,05	н/о	н/о	0,08	0,26	0,15	0,17
	H <sub>2</sub> O	0,84	0,15	0,14	0,16	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	п.п.п.	1,3	2,27	5,67	2,46	1,38	0,72	1,5	0,48
	сумма	99,5	99,29	99,24	99,07	99,22	99,34	72,44	99,16

Примечание. 282 – роговообманковый габбродиорит, 282А – хлоритизированный биотит-амфиболовый габбродиорит, 282Б – хлорит-гальковая порода, 282В – пироксен-амфиболовая порода, 219 – биотитовые диориты, 219Б – полевошпат-кварцевые метасоматиты, 219В – биотит-полевошпат-кварцевые метасоматиты, 219Г – биотит-гранат-кварцевый метасоматит

Таблица 2

Содержания элементов в породах  
по данным полуколичественного спектрального анализа

	Элемент	Номера проб												
		282	282А	282Б	282В	282Д	282Е	219Б	219В	264	264А	264Б	265-1	266А
Содержания элементов, г/т	Ni	60	50	200	300	400	600	80	80	50	40	60	80	100
	Cu	50	50	200	100	100	150	30	50	50	30	50	100	60
	Co	30	30	100	150	150	150	10	10	30	30	40	80	100
	Ag	0	0	0	0,05	0	0	0	0,05	0	0	0	0	0,05
	Cr	200	300	200	200	2000	2000	50	80	800	300	500	2000	2000
	Ti	3000	2000	1000	1500	1000	1000	3000	4000	1000	1500	1000	1500	1000
	Mn	600	800	1500	1500	2000	1500	100	300	800	800	800	1000	2000
	V	200	150	300	500	400	500	80	200	200	200	200	500	500
	Sc	5	5	8	8	6	6	2	4	5	5	5	10	10
	Zn	80	80	150	150	150	150	60	80	80	60	60	150	100
	Pb	10	15	10	8	5	10	40	30	15	10	10	6	6
	Sn	2	3	4	0	0	3	3	3	3	3	2	3	0
	Mo	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	0,5	0,5	1	1,5
	B	10	8	15	10	10	8	10	5	10	10	10	10	10
	Ba	100	0	0	0	0	0	500	600	100	100	100	0	0
	Sr	300	200	0	30	0	30	100	80	150	200	150	50	40
	P	0	1000	0	0	0	0	1000	1000	0	0	0	0	0
	Ga	15	10	8	10	8	8	10	10	20	20	20	8	8
Ge	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	
Y	3	0	0	0	0	0	5	10	0	3	0	0	0	
Zr	80	30	30	30	30	20	100	150	40	30	40	40	50	

Примечание. 282 – роговообманковый габбродиорит, 282А – хлоритизированный биотит-амфиболовый габбродиорит, 282Б – хлорит-тальковая порода, 282В – пироксен-пироксеновая порода, 282Д – хлорит-тальковая порода, 282Е – тальк-хлоритовая, 219Б – полевошпат-кварцевые метасоматиты, 219В – биотит-полевошпат-кварцевые метасоматиты, 264 – слабосерпентинизированный лейкократовый габбродиорит, 264А – биотит-полевошпатовый метасоматит, 264Б – эпидот-хлорит-гранатовая порода, 265-1 – пироксен-амфиболовая порода, 266А – амфибол-пироксеновая порода.

Калиевые полевые шпаты составляют 10%. Это преимущественно ортоклаз, кристаллы которого имеют пертитовые выделения альбита; более ограниченно развит микроклин. Биотит (15%) наблюдается в виде ксеноморфных выделений, цементирующих кристаллы полевых шпатов, и нередко замещен хлоритом и кварцем. С псевдоморфозами хлорита по биотиту связаны гнезда рудных минералов (< 1%). В породе ограниченно развиты идиоморфные чешуйки мусковита (2–3%).

Собственно кварцевые жилы (обр. 219Б) сложены округленными крупными (1–3 мм) зернами кварца (70%) с многочисленны-

ми газовой-жидкими включениями; неправильно-таблитчатыми кристаллами ортоклаза (15%) с включениями серицита и кварца; округленно-таблитчатыми кристаллами плагиоклаза (10%); чешуйками мусковита (5%). Наблюдается замещение мусковита кварцем, гидрослюдой, тальком, хлоритом и эпидотом. В периферической части жил установлены сростания биотита и граната, выделения волокнистого хлорита и спутанно-игольчатый агрегат турмалина. В экзоконтактной части жил (обр. 219Б) развиты мелкозернистые полевошпат-кварцевые метасоматиты, сложенные кварцем (70%), биотитом (10%), олигокла-

зом № 28–30 (10%), ортоклазом (5%), гранатом (1–2%) и единичными выделениями турмалина и мусковита. Рудные минералы (3–5%) представлены магнетитом, содержащим включения анизотропного ильменита. Местами ильменит занимает до 50% объема магнетита. Чаще всего это мелкие пластинки и изометричные выделения. Единично – мельчайшие зерна пирита квадратного сечения.

Отдельные участки околосильных измененных пород состоят из биотит-полевошпат-кварцевый комплекс минералов (обр. 219В). Порода имеет пятнистую текстуру и лепидогранобластовую структуру. Кварц (50%) представлен округлыми свежими зернами. Зерна альбита № 3–6 (10–15%) частично замещены гидрослюдой, калиевые полевые шпаты (15%) серицитом. Зерна граната (20%) нередко образуют сложно построенные агломераты; в них наблюдаются включения апатита и циркона. Биотит (15%) расположен в интерстициях между остальными минералами; вокруг него наблюдаются оторочки рудных минералов. Среди рудных преобладает магнетит, представленный ксеноморфными по отношению к биотиту выделениями. В трещинках установлены единичные мельчайшие (0,00 п мм) зерна пирита и халькопирита. Структура рудных образований сидеронитовая, каемочная, пойкилитовая и эмульсионно-пойкилитовая; текстура гнездово-вкрапленная и гнездовая.

Биотит-гранат-полевошпат-кварцевая зона переходит в полосчатый биотит-гранат-кварцевую породу (Р-219Г), которая макроскопически состоит из вертикальных различно окрашенных чередующихся зон. Микроскопически полосчатость обусловлена чередованием крупнозернистых кварцевых прожилков и мелкозернистого кварцевого и полевошпатового агрегата, насыщенного серицитом. В крупнозернистом кварце установлены газово-жидкие и твердые включения, не выходящие за пределы кристаллов. Газовая фаза некоторых газово-жидких включений занимает до 80% объема вакуолей. В кварце встречаются иголки апатита. Собственно кварцевые зонки чередуются с зонками, обогащенными биотитом и мусковитом, а также иногда содержащими до 40% граната. В качестве второстепенных минералов в материале зонок встречаются зерна рудных, карбонатов, турмалина.

В породах данного зонального комплекса отмечены повышенные содержания платины, свинца, циркония, хрома (табл. 1);

больше, чем в других породах, содержится  $\text{SiO}_2$ , щелочей ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ).

Можно предположить, что при образовании данного комплекса измененных пород вначале имел место инъекционный метаморфизм, при котором происходило формирование полосчатого мигматита. Развивались прожилковые зоны плагиогранита и послонные полевошпат-кварцевые, биотит-кварцевые и биотит-гранат-кварцевые мигматиты. Их образование может быть связано с процессом гранитизации, при котором происходил привнос циркулирующими растворами щелочей, кремнезема и вынос кальция, магния и железа. В раннюю щелочную стадию могли образовываться полевошпатовые породы. В последующую кислотную стадию гранитизации в результате привноса кремнезема развивались кварцевые прожилки, ориентированные по сланцеватости ранее образованных пород. В стадию осаждения происходило отложение биотита, граната, эпидота, магнетита и сульфидов. В ходе последующего низкотемпературного метасоматоза были серицитизированы и сосюритизированы плагиоклазы, хлоритизированы биотиты.

Северо-восточнее т.н. 282, на продолжении описанной зоны измененных пород, в истоках р. Перевозная (т.н. 264, 265, 266; рис. 2) продолжает проследиваться зональный комплекс пород. Зона сложена метасоматически измененными породами – биотитизированными, графитизированными, окварцованными. Она содержит также вкрапленники сульфидов, лимонитизирована. Вмещающая порода – лейкократовый габбродиорит (обр. 264) – слабо серпентизирована, что выразилось в замещении пироксенов и оливина волокнистым агрегатом хризотила. При этом от исходных минералов сохранились лишь отдельные фрагменты. Кроме того, здесь наблюдаются землистые неопределимые микроскопические массы, в которых наблюдаются волокна хризотила, гнезда эпидота, брусит, вкрапленники сульфидов. Возможно, процесс серпентинизации вызван воздействием гидротерм внедрившейся интрузии гранитоидов. Этим фактом обусловлено и развитие контактово-метасоматического зонального комплекса. Здесь сменяют друг друга существенно полевошпатовая и пироксен-амфиболовые зоны.

В полевошпатовой зоне (обр. 264А) преобладает плагиоклаз (до 80%) (лабрадор № 50–54) (плагиоклаз здесь более кислый, чем в исходном габбродиорите). До 10%



объема породы сложено округленными выделениями амфибола, которые почти нацело замещены биотитом. Встречены также единичные зерна кварца, микроклина и энстатита, частично замещенного эпидотом. Из рудных наблюдаются единичные мелкие кристаллы пирротина и пентландита. В сростании с пирротинном установлены гипидиоморфные выделения халькопирита. Сульфиды пространственно связаны с выделениями биотита и образуются, по-видимому, в гидротермальную стадию.

В полевошпат-амфиболовой зоне также наблюдаются субграфические прорастания пирротина в биотите. В породе рассеяны зерна магнетита. Аналогичные рудные минералы установлены и в пироксен-амфиболовой зоне. Текстура рудной массы неравномерно-вкрапленная, вкрапленно-прожилковая; структура эмульсионная, эмульсионно-сидеронитовая, каемочная.

В амфибол-полевошпатовой зоне (обр. 264Б) ранее образовавшиеся минералы практически нацело замещены дейтерогенными биотитом, мусковитом, хлоритом и эпидотом. Кроме того, здесь установлены единичные кристаллы кордиерита, гнезда волокнистого силлиманита и наблюдаются зонки, выполненные тонкозернистым гранатом и рудными минералами в ассоциации с биотитом и мусковитом.

В пироксен-амфиболовой зоне (обр. 265-1) доминирует высокотемпературный амфибол – паргасит (30%), представленный округлыми, почти изометричными бесцветными зернами с совершенной спайностью. Ксеноморфные выделения более позднего куммингтонита (15%) включают в себя зерна паргасита. Пироксены представлены изоморфными кристаллами энстатита (10%) и гиперстена (15%). Ксеноморфные выделения кварца (5%), ортоклаза (5%) и кристаллы плагиоклаза (5%) развиты ограниченно в виде скоплений.

Изменения пород и при этом возможное перераспределение рудного вещества обусловлены внедрением пострудных интрузий кольского комплекса [1, 2, 8]. Проявления позднемелового, палеоцен-эоценового гранитоидного магматизма на Камчатке связаны с тектоно-магматической активацией, в результате которой произошли метаморфические изменения отложений Камчатского срединного массива в целом. Наблюдаемые преобразования рудовмещающих пород характерны для многих проявлений Камчатской никеленозной провинции, таких например, как Аннабергитовая

Щель, Северное, где были встречены как пироксен-амфиболовые измененные породы, так и жильные мелкозернистые мусковит-биотитовые плагиограниты, несущие повышенные количества сульфидных рудных минералов. По предположениям [8] сульфидные кобальт-медно-никелевые руды проявления Аннабергитовая Щель образовались в результате магматической дифференциации в процессе становления интрузий норит-кортландитовой формации и дальнейших эпимагматических преобразований. Контактново-метасоматический этап формирования этих руд и пород связан с внедрением пострудных гранитоидов, были оценены условия образования кварц-полевошпатовых метасоматитов. По [8, 9] это происходило при температурах 350–600 °С на глубинах  $\leq 5$  км в равновесии с растворами, близкими к нейтральным (рН 4,5–6,5). Ассоциация гидротермальных минералов руд и пород формировалась в условиях, близких к пропилитизации на глубинах  $\leq 5$  км ( $\sim \leq 0,15$  ГПа) при рН 4,5–6,5 и температуре 150–350 °С [9, 10].

Исследования флюидных включений (в плагиоклазе) из гидротермально-измененных пород Кувалорогского массива было проведено в 2007 г. Э.Г. Конниковым, О.Н. Васюковой. Выявлено, что даже в породах с редкими вкрапленниками сульфидов встречаются  $\text{CH}_4$ -содержащие включения, пространственно связанные с выделениями сульфидов. Они расположены вблизи от вкрапленников рудных, приурочены к окружающим вкрапленники трещинам и могли образоваться за счет летучих, выделяющихся из сульфидной капли. Включения в составе вторичных включений в минералах рудовмещающих пород, замещение пироксена амфиболами, биотитом, кварцем также указывают на сложный процесс рудообразования.

Ранее накопленный материал по сульфидным медно-никелевым объектам Камчатской никеленозной провинции, его обобщение, а также анализ выявленных особенностей строения исследованных метаморфогенно-метасоматических зональных комплексов, особенностей распределения и взаимоотношения рудных минералов в исходных и измененных породах, установленных парагенетических минеральных ассоциаций позволяют сделать вывод о том, что процесс сульфидного кобальт-никелевого рудообразования в рассматриваемом регионе имел сложный многоэтапный характер.

Эмульсионно-вкрапленные пирротин и магнетит являются, вероятно, сингенетичными с габброидами. На раннем собственно магматическом этапе происходило развитие сингенетичной вкрапленности магнетита и пирротина. Этот факт находится в соответствии с широко известными экспериментальными и расчетными данными о низкой растворимости серы в основных расплавах [5, 11].

В постмагматический этап мог происходить перенос значительной массы рудного вещества в составе высокотемпературных флюидов, действующих в зонах повышенной проницаемости, приуроченных к крупным долгоживущим разломам и связывающим магматические камеры с гипабиссальными горизонтами земной коры. Происходящие в этих камерах процессы дифференциации привели к развитию широкого комплекса магм, последовательное внедрение которых вызвало образование контактово-метасоматических образований. В дальнейшем в образовавшиеся пироксен-гранатовые роговики проникали маломощные инъекции гранитного и пегматитового материала.

В результате последующего пневматолито-гидротермального метасоматоза происходило замещение пироксенов амфиболами. При последующем возрастании в растворах содержания калия развивались биотит и калиевые полевые шпаты. Рудименты пироксенов были замещены волокнистыми псевдоморфозами серпентина и талька.

В ходе дальнейших аутометасоматических процессов происходила хлоритизация темноцветных минералов и серицитизация, сосюритизация, эпидотизация и альбитизация полевых шпатов.

Характер взаимоотношений минералов указывает на то, что основные рудные элементы (железо, никель, кобальт, платиноиды) могли мобилизоваться из исходных и новообразованных темноцветных минералов (оливина, ромбических пироксенов, амфибола, биотита) при их разложении и замещении. Факт привноса меди в зону отложения рудных минералов гидротермальными растворами находит свое подтверждение в ксеноморфизме халькопирита по отношению к прочим сульфидам. Представляется возможным многократное осаждение рудного материала, вызываемое резкими изменениями физико-химических условий среды при смене магматического, метасоматического и метаморфического этапов.

### Заключение

Исследован комплекс метасоматических зональных комплексов на юго-восточном фланге интрузивного массива Кувалорог, локализованный в разрывных нарушениях, пересекающих интрузив, и рассмотрены возможности их рудоносности. Небольшой объем опробования, его недостаточная плотность не позволили более полно рассмотреть возможности рудоносности измененных пород из тектонически ослабленных зон. Несмотря на это, получены новые данные, представляющие поисковый интерес.

Линейно-вытянутые в северо-восточном направлении от проявления Рассоха до проявления Кувалорог, а также другие подобные зоны метасоматически измененных пород могут рассматриваться как структуры потенциально перспективные для локализации в них эпигенетических сульфидных руд инъекционного типа. На раннем собственно магматическом этапе происходило развитие сингенетичной вкрапленности рудных минералов; на постмагматическом – перенос значительной массы рудного вещества в составе высокотемпературных флюидов, действующих в зонах повышенной проницаемости и приуроченных к зонам долгоживущих разломов. Об этом свидетельствует парагенетическая связь наиболее богатых сульфидных руд Кувалорогского интрузива (проявления Аннабергитовая Щель, Квинум II) [8, 12] с интенсивно измененными основными и средними интрузивными породами, претерпевшими в постмагматический этап интенсивные аутометасоматические преобразования и практически нацело превращенными в тальк-хлоритовые породы, нередко с вкрапленностью рудных минералов.

Необходимо проведение дальнейших последовательных исследований, заключающихся в тщательном дешифрировании космо- и аэрофотоснимков, структурных исследований, крупномасштабной петроструктурной и петрологической съемки как интрузивного массива Кувалорог, так и более мелких рудоносных интрузий Камчатской никеленосной провинции, с целью выявления особенностей локализации сульфидной медно-никелевой минерализации. Это позволит оценить вклад в рудный процесс эпигенетических изменений, особенностей перераспределения рудного вещества на заключительной стадии рудномагматического процесса, что имеет важное практическое значение для более детальных и дорогостоящих исследований последующих этапов прогнозно-поисковых работ.

## Список литературы

1. Новаков Р.М. Перспективы никеленосности плутонических мафит-ультрамафитовых формаций Камчатки: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Санкт-Петербург, 2018. 24 с.
2. Тарарин И.А., Бадрединов З.Г., Чубаров В.М. Петрология и рудоносность метаморфических и магматических комплексов Центральной и Восточной Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2015. 302 с.
3. Ненахов В.М., Никитин А.В. К проблеме структурного контроля Квинум-Кувалорогской рудной зоны (Камчатка) // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2015. № 3. С. 65–70.
4. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д. Камчатская никеленосная провинция // Доклады Академии наук. 2008. Т. 418. № 6. С. 802–806.
5. Селянгин О.Б. Контаминация магмы, особенности петрогенезиса и распределение рудного вещества в породах никеленосной формации Срединно-Камчатского массива (часть третья) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебный научный центр». Науки о Земле. 2018. Вып. 4. (40). С. 5–22. DOI: 10.31431/1816-5524-2018-4-40-5-22.
6. Кунгурова В.Е., Трухин Ю.П., Кувакин Г.В. Сульфидное медно-никелевое рудопроявление Рассоха (Дукукский рудный район, Камчатка) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Специальный выпуск. 2016. № 31. № 11. С. 72–82.
7. Дворник Г.П. Виды метасоматических пород: температурные условия образования, особенности состава, минералогия // Известия УГГП. 2020. Вып. 1 (57). С. 63–72.
8. Новаков Р.М., Кунгурова В.Е., Москалева С.В. Условия образования благороднометалльной минерализации в сульфидных кобальт-медно-никелевых рудах Камчатки (на примере рудопроявления Аннабергитовая Щель // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 1–15. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.5.
9. Бардина Н.Ю., Попов В.С. Систематика метасоматических горных пород и фаций метасоматизма малых глубин // Советская геология. 1991. № 6. С. 48–56.
10. Holwell D.A., Zeinab A., Warda L.A., Smith D.J., Graham S.D., McDonald I., Smith J.W. Low temperature alteration of magmatic Ni-Cu-PGE sulfides as a source for hydrothermal Ni and PGE ores: A quantitative approach using automated mineralogy // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 91. P. 718–740.
11. Naldrett A.J. Magmatic sulfide deposits – Geology, Geochemistry, and Exploration. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 727 p.
12. Еременко Д.В., Еременко А.В., Золотарева Г.С. Вторичные изменения никеленосных пород дукукского комплекса Камчатки // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2019. № 1. С. 39–46.