

Научная статья
УДК 551.21:213.3
DOI 10.46698/VNC.2024.60.71.001

Рудно-магматические системы Эльбрусского вулканического центра

Анатолий Георгиевич Гурбанов

Институт геологии рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Лаборатория петрографии, ведущий научный сотрудник, Москва; Владикавказский научный центр Российской академии наук, Комплексный научно-исследовательский отдел, ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, РСО-Алания, Пригородный район, с. Михайловское ag.gurbanov@yandex.ru

Виктор Магалимович Газеев

ИГЕМ РАН, Лаборатория петрографии, научный сотрудник, Москва; Владикавказский научный центр Российской академии наук, Комплексный научно-исследовательский отдел, старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, РСО-Алания, Пригородный район, с. Михайловское, gazeev@igem.ru

Александр Яковлевич Докучаев

ИГЕМ РАН, ведущий научный сотрудник, заведующий Рудно-петрографическим сектором-музеем, кандидат геолого-минералогических наук, Москва, alexandre-dokuchayev@yandex.ru

Сергей Семенович, Абрамов

ИГЕМ РАН, Лаборатория метаморфизма и метасоматизма, старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, Москва

Елена Олеговна Грознова

Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук (ИЭМ РАН), Лаборатория гидротермальных процессов, старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, Россия, Московская область, г. Черноголовка

Алексей Борисович Лексин

ИГЕМ РАН, лаборатория «Геоинформатика», специалист, Москва

Ольга Александровна Гурбанова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, ассистент кафедры минералогии и кристаллохимии, кандидат химических наук, Россия, Москва

Аннотация. Актуальность исследований. В истории развития плейстоцен-голоценового Эльбрусского вулканического центра (ЭВЦ) выделены докальдерная, кальдерная и посткальдерная стадии. В двух последних выделены ранние и поздние этапы. С экстрезивными телами дацитового состава (поздний этап кальдерной стадии) связано широкое проявление как в экстрезиях, так и во вмещающих их лавах, гидротермально-метасоматических преобразований. В пределах ЭВЦ нами впервые были выделены Кюкюртлинская (КРМС) и Ирикская (ИРМС) рудно-магматические системы, первая из которых является более перспективной на обнаружение промышленно значимой рудной минерализации. Объектами исследований были Кюкюртлинская и Ирикская РМС. Методы исследований. Определения концентраций микро- и макроэлементов в породах РМС проводились в ЦКП «ИГЕМ - АНАЛИТИКА» методами РФА и инструментальным нейтронно-активационным анализом (ИНАА). Состав жильных минералов в метасоматически измененных породах изучался методом термогравиметрического анализа и рентгено-фазового анализа. Составы сульфидных минералов и самородных металлов определены на микроанализаторе "Camebax SX-50" и на сканирующем электронном микроскопе в ИГЕМ РАН. Для оценки температур образования рудной минерализации и составов растворов были изучены флюидные включения (ФВ) в минералах из экстрезивных тел и вторичных кварцитов. Микротермометрия, в интервале температур от -196 до +600 °С, проводилась на термокриокамере "Linkam-THMSG 600". Результаты исследований и их обсуждение. В породах кальдерной стадии рудная минерализация представлена магнетитом, ильменитом, пиритом, пирротинном, арсенопиритом, халькопиритом, миллеритом, галенитом и тонкодисперсными частицами самородной меди. В дацитах экстрезии Кюкюртлю пириты и пирротины имеют стехиометрический состав и сходство с сульфидами из пород кальдерной стадии ЭВЦ и отличаются от пиритов и пирротинных посткальдерной стадии. Особенности составов рудных минералов свидетельствуют о наложении гидротермально-метасоматических образований, связанных с эволюцией гидротермальной системы РМС Кюкюртлю на породы кальдерной стадии. Температуры гомогенизации флюидных включений в кварце и карбонате секущих прожилков из апикальной части экстрезии РМС Кюкюртлю составляют 140-170 °С. Температуры образования халькопирит-пирит-пирротинового парагенезиса (рассчитаны по термометрическим уравнениям) для экстрезии КРМС составили 190 °С. Гидротермальные растворы, участвовавшие в метасоматических изменениях пород КРМС и сформировавшие вторичные кварциты, имели фторидный состав (обнаружены фторсодержащие минералы – жарчихит, ральстонит, α-ральстонит и флюорит). По составу и текстурно-структурным признакам, выявленная в КРМС рудная минерализация отнесена к медно-порфировому генетическому типу (на надрудном уровне эрозийного среза). Судя по тому, что в вулканиках КРМС установлены резко повышенные содержания Ag, Mo, Cu, Zn, Pb, As, Sb, Se и Ba, а также по масштабности и площадному характеру развития процесса аргиллизации, в зоне пропилитизации, на глубинах от 400 м до 600 м от современного эрозийного среза КРМС, можно ожидать обнаружение жильного Pb-Zn оруденения, а на более глубоких уровнях (от 600 до 1000 м) – прожилково-вкрапленного Au-Ag, Cu или Cu-Mo оруденения верхней части порфировой рудно-магматической системы, связанных с экстрезивными телами дацитового состава.

Ключевые слова: Эльбрусский вулканический центр, Кюкюртлинская рудно-магматическая система, гидротермально-метасоматические процессы, рудная минерализация
Для цитирования: Гурбанов А.Г., Газеев В.М., Докучаев А.Я., Абрамов С.С., Грознова Е.О., Лексин А.Б., Гурбанова О.А. Рудно-магматические системы Эльбурского вулканического центра // Вестник Владикавказского центра РАН. 2024. Т. 24. № 2. С. 66–80. DOI 10.46698/VNC.2024.60.71.001

Ore-magmatic systems of the Elbrus volcanic center

Anatoly G. Gurbanov

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), laboratory of Petrography, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Moscow; Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Complex Research Research Department, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Russia, North Ossetia-Alania, Prigorodny district, s. Mikhailovskoe, ag.gurbanov@yandex.ru

Victor M. Gazeev

IGEM RAS, laboratory of Petrography, researcher, Moscow; Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Complex research department, senior researcher, candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, Russia, North Ossetia-Alania, Prigorodny district, s. Mikhailovskoe, gazeev@igem.ru

Alexander Y. Dokuchaev

IGEM RAS, Leading Researcher, Head of the Ore-Petrographic Sector-Museum, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Moscow, Russia, alexandre-dokuchayev@yandex.ru

Sergey S. Abramov

GEM RAS, Laboratory of Metamorphism and Metasomatism, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Moscow

Elena O. Groznova

Institute of Experimental Mineralogy named after Academician D.S. Korzhinsky of the Russian Academy of Sciences (IEM RAS). Laboratory of Hydrothermal Processes, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Russia, Moscow region, Chernogolovka

Alexey B. Lexin

IGEM RAS, laboratory "Geoinformatics" workshop, specialist, Russia, Moscow

Olga A. Gurbanova

Moscow State University M.V. Lomonosov, Faculty of Geology, Assistant of the Department of Mineralogy and Crystalchemistry, Candidate of Chemical Sciences, Russia, Moscow.

Abstract. Relevance of research. In the history of the development of the Pleistocene-Holocene Elbrus Volcanic Center (EVC), pre-caldera, caldera, and post-caldera stages are distinguished. In the last two stages, early and late halting place (stages) are distinguished. Extrusive bodies of dacitic composition late halting place of the caldera stage are associated with a wide manifestation of hydrothermal-metasomatic transformations both in extrusions and in lavas containing them. Within the EVC, we for the first time identified the Kyukyurtinskaya (KOMS) and Irikskaya (IOMS) ore-magmatic systems, the first of which is more promising for the discovery of industrially significant ore mineralization. The objects of research were the Kyukyurtly and Irik OMS. Research methods. Determination of the concentrations of micro- and macroelements in OMS rocks was carried out at the Central Collective Use Center "IGEM - ANALYTICS" using X-ray diffraction analysis and instrumental neutron activation analysis (INAA). The composition of vein minerals in metasomatically altered rocks was studied by thermogravimetric analysis and X-ray phase analysis. The compositions of sulfide minerals and native metals were determined on a Camebax SX-50 microanalyzer and on a scanning electron microscope at the IGEM RAS. Fluid inclusions (FI) in minerals from extrusive bodies, secondary quartzites were studied to estimate the temperatures of formation of ore mineralization and compositions of solutions. Microthermometry, in the temperature range from -196 to +6000C, was carried out on a Linkam-TNMSG 600 thermal cryochamber. Research results and discussion. In rocks of the caldera stage, ore mineralization is represented by magnetite, ilmenite, pyrite, pyrrhotite, arsenopyrite, chalcopyrite, millerite, galena, and fine particles of native copper. In the dacites of the Kyukyurtlyu extrusion, pyrites and pyrrhotites have a stoichiometric composition similar to sulfides from rocks of the EVC caldera stage and differ from pyrites and pyrrhotites of the post-caldera stage. The compositional features of ore minerals indicate the superposition of hydrothermal-metasomatic formations associated with the evolution of the Kyukyurtly hydrothermal system on rocks of the caldera stage. The homogenization temperatures of fluid inclusions in quartz and carbonate of secant veinlets from the apical part of the extrusion of the OMS Kyukyurtly are 140-170 °C. Temperatures of formation of chalcopyrite-pyrite-pyrrhotite paragenesis (calculated according to thermometric equations) for extrusion of KOMS were 190 °C. Hydrothermal solutions that participated in the metasomatic alteration of the KOMS rocks and formed secondary quartzites had a fluoride composition (fluorine-containing minerals were found - jarchichite, ralstonite, α -ralstonite, and fluorite). In terms of composition and textural-structural features, the ore mineralization identified in the KOMS is attributed to the porphyry copper genetic type (at the supra-ore level of the erosion cut). Judging by the fact that sharply elevated contents of Ag, Mo, Cu, Zn, Pb, As, Sb, Se, and Ba have been established in the KOMS volcanics, as well as by the scale and areal nature of the development of the argillization process, in the propylitization zone, at depths from 400 m to 600 m from the modern erosive section of the KOMS, one can expect the discovery of vein Pb-Zn mineralization, and at somewhat deeper levels (from 600-1000 m) - vein-disseminated Au-Ag, Cu or Cu-Mo mineralization of the upper part of the porphyritic ore-magmatic system, associated with extrusive bodies of dacite composition.

Keywords: Elbrus volcanic center, Kyukyurtly ore-magmatic system, hydrothermal-metasomatic processes, ore mineralization.

For citation: Gurbanov A.G., Gazeev V.M., Dokuchaev A.Ya., Abramov S.S., Groznova E.O., Leksin A.B., Gurbanova O.A. Ore-magmatic systems of the Elbrus volcanic center // Bulletin of the Vladikavkaz Center of the Russian Academy of Sciences. 2024. Vol.24. No.2 , P. 66–80. DOI 10.46698/VNC.2024.60.71.001

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в мировой практике при прогнозной оценке территорий на металлические полезные ископаемые важная роль отводится рудно-магматическим системам (РМС), под которыми понимается совокупность вулканитов, интрузивов и вмещающих их пород, а также возникших в них геохимических полей концентрирования ряда рудных элементов [12]. Выявление РМС весьма актуально для оценки потенциальной рудоносности новейшего вулканизма Большого Кавказа. До настоящего времени в пределах Эльбрусского вулканического центра (ЭВЦ) и одноименной кальдеры не были известны рудоносные гидротермально-метасоматические образования, но проведенные нами комплексные исследования позволили пересмотреть эту точку зрения. В пределах ЭВЦ впервые были выделены Кюкюртлинская (КРМС) и Ирикская (ИРМС) рудно-магматические системы, связанные с его кальдерной стадией развития [9, 4, 5]. Изучение состава, стадийности, зональности и физико-химических условий формирования рудной минерализации в пределах КРМС позволяет оценить ее как наиболее перспективную на выявление промышленно значимого типа оруденения. О возможности обнаружения в пределах ЭВЦ рудной минерализации свидетельствуют следующие, установленные нами, факты:

1. Для неизмененных пород (лавы, субвулканические тела андезидацитового, дацитового, риодацитового и риолитового составов) характерны следующие, повышенные по сравнению с кларковыми величинами [2], содержания (в г/т) ряда рудных элементов: Mo (от 5 до 9, но чаще от 9 до 13); Zn (от 63 до 73, а в некоторых голоценовых лавовых потоках – от 243 до 335); Pb (от 19 до 56, а в ряде голоценовых потоков – от 2 599 до 3 007); As (от 5 до 9, но чаще от 10 до 19); Sb (от 2.7 до 7.4); Au (в единичных пробах до 0.038); Se (от 2 до 4); Ba (от 489 до 578).

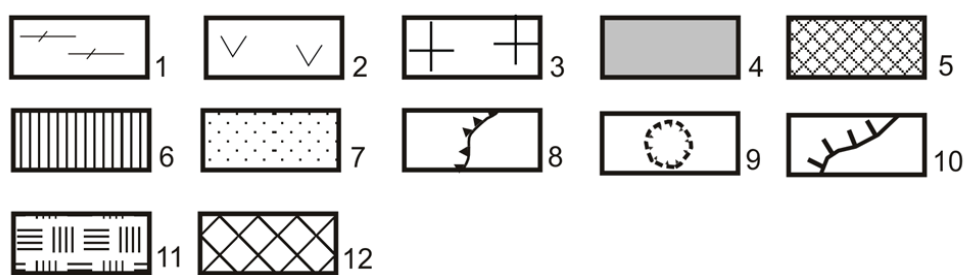
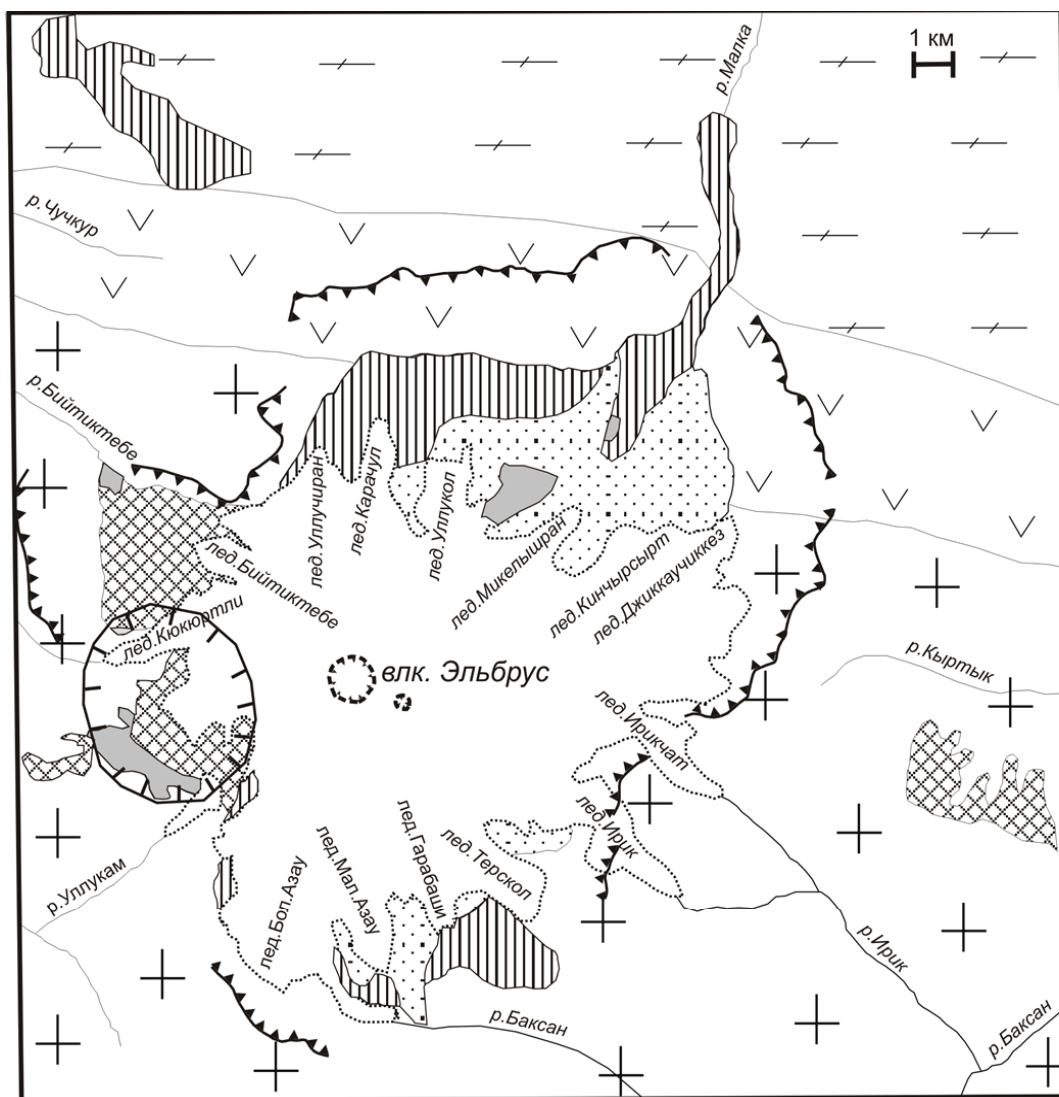
2. Для гидротермально-метасоматически измененных вулканитов ЭВЦ характерны повышенные содержания (в г/т): Mo (от 10 до 63); Zn (от 111 до 497, а в единичных пробах – от 2 394 до 3 115); Pb (от 72 до 690); As (от 35 до 151 и редко от 218 до 322); Sb (от 44 до 71, а в единичных пробах – от 439 до 1419); Cu (от 33 до 111); Ag (от 2.9 до 16); Au (от 0.035 до 0.048); W (от 10 до 144); Se (до 11); Ba (от 635 до 702).

При анализе этих данных важно было понять, за счет чего иногда возникали довольно высокие концентрации ряда рудных элементов [8]. Ответ на этот вопрос был получен после детальных минералогических исследований видового и геохимического составов акцессорных минералов в породах ЭВЦ. Установлены следующие рудные минералы: пирит (стехиометрического состава, а также Ni-, Co-, Ni-Co пирит), марказит, магнетит, ильменит, арсенопирит, пирротин (Ni- и Co-разновидности),

халькопирит, галенит, сфалерит, миллерит и шеелит. Впервые были выявлены самородные железо, медь, свинец, олово, а также неправильной формы (в виде проволочек, закрученных стружек) выделения, представленные сплавами окислов железа со свинцом и оловом; углерода с медью.

Еще одной причиной изучения потенциальной рудоносности плейстоцен-голоценовых вулканических комплексов Большого Кавказа явилась их близость по составу и геодинамической обстановке с чилийскими стратовулканами и секущими их, более молодыми, субвулканическими порфировыми интрузивными штоками (subvolcanic dome) с широко проявленными наложенными позднемагматическими изменениями (аргиллизация, пропилизация и др., как вмещающих вулканитов, так и штоков). С этими структурами в Чили [22], на западе США и в Мексике [17, 18, 19] генетически связывают крупные медно-порфировые и медно-молибден-порфировые месторождения. В северной части Чили, в пределах пояса Марикунга (Maricunga Belt) эксплуатируется ряд крупных золото-порфировых месторождений с невидимым золотом, обладающих следующими общими чертами геологического строения. Приурочены они к вулканическим постройкам ранне- и позднемиоценового возраста (13 и 23 млн лет), сложенными лавами андезитового и реже дацитового составов и прорывающими их крупными субвулканическими штоками микродиоритов, диоритов и кварцевых диоритов, внедрившихся в жерла стратовулканов. Как сами субвулканические тела, так и вмещающие их лавы претерпели интенсивные гидро-термально-метасоматические изменения с образованием кварц-хлорит-каолин-серицитовой минеральной ассоциации. По этим измененным породам очень часто развивается кварц-сфалерит-магнетитовый или кварц-магнетит-сфалеритовый штокверг с рудной минерализацией, имеющей довольно большие объемы. На таких рудных объектах над субвулканическими телами обычно присутствует аргиллизитовая «шляпа» (золоторудные месторождения Марте, Ла Пела, Вaley и др.), но иногда она отсутствует, т. е. эродирована (золоторудные месторождения Лобо, Эскандида, Рефугио). Для месторождений этого типа характерно неравномерное распределение и относительно низкие концентрации невидимого золота, а также меди, молибдена. При низких содержаниях золота, но больших объемах руды такие месторождения успешно эксплуатируются в Чили. Например: месторождение Марте с запасами Au около 66 тонн при средних содержаниях (в г/т) Au = 1.43, Cu = 500, Mo = 4.6; месторождение Лобо с запасами Au до 128 тонн при средних содержаниях Au = 1.6, Cu = 1200, Mo = 7.1; месторождение Рефугио с запасами Au до 194 тонны при средних содержаниях Au = 0.96, Cu = 800, Mo = 29.

Приведенные выше данные по вулканогенным эпитепмальным Au-Ag, Cu-порфировым и Cu-Mo-порфировым рудно-магматическим системам мира



Условные обозначения:

1-3 - структурно-формационные зоны: 1 - Бечасынская, 2 - Передового хребта, 3 - Главного хребта; 4-7 - вулканические комплексы: 4 - раннего этапа кальдерного цикла, 5 - позднего этапа кальдерного цикла, 6 - раннего этапа посткальдерного цикла, 7 - позднего этапа посткальдерного цикла; 8 - контуры Эльбрусской кальдеры; 9 - Восточная и Западная вершины вулкана Эльбрус; 10 - предполагаемые контуры Кюкюртлинской рудно-магматической системы; 11-12 - гидротермально-метасоматические образования: 11 - вторичные кварциты, 12 - гейзериты

Рис.1. Схематическая геологическая карта распределения вулканических комплексов и гидротермально-метасоматических образований Эльбурского вулканического центра

[22, 23, 24, 16, 14. 20, 21, 7 и др.] явились основанием для проведения специальных исследований по оценке перспектив обнаружения в пределах ЭВЦ рудной минерализации.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ЭВЦ

В истории развития ЭВЦ выделены следующие стадии в его эволюции: докальдерная, кальдерная и посткальдерная (рис. 1). Две последние подразделены на ранние и поздние этапы [1, 9].

Докальдерная стадия вулканической активности (нижний неоплейстоцен) представлена останцами лавовых потоков трахиандезибазальтового (верховья реки Тызыл) и трахиандезидацитового (устьевая часть реки Худес) составов.

Ранний этап кальдерной стадии (верхи среднего неоплейстоцена) представлен залегающими в основании вулканической постройки Эльбруса наиболее кислыми породами – риолитами и риодацитами (истоки реки Уллу-кам) с синхронными им и идентичными по составу реликтами толщ игнибритов и туфов с характерным серым кварцем (истоки рек Кюкюртлю, Бийтик-Тебе, Чучхура и Малки).

Поздний этап кальдерной стадии (низы верхнего неоплейстоцена) представлен агломератовыми лавами, лавовыми потоками, реликтами туфовых горизонтов и экструзивными (субинтрузивными) телами дацитового состава. Наиболее крупное (1,6 × 1,1 км и 0,8 км в вертикальном эрозионном срезе) экструзивное куполообразное тело дацитового состава обнаружено в «стене Кюкюртлю» в жерле средне-верхнеооплейстоценового вулкана Кюкюртлю. Мелкие (5–40 × 50–200 м) экструзивные тела дацитового состава обнажаются в истоках рек Уллу-кам, Кюкюртлю и Бийтик-Тебе. В экзоконтактах экструзивных тел широко проявлены гидротермально-метасоматические изменения в прорываемых ими разновозрастных лавовых потоках, сопровождающиеся пирит-марказитовой и, реже, пирротин-халькопиритовой минерализацией.

Ранний этап посткальдерной стадии (середина – верхи позднего неоплейстоцена) характеризуется излиянием лав дацитового состава и эксплозивными извержениями пирокластического материала (туфы и пеплы дацитового состава).

Поздний этап посткальдерной стадии (голоцен) представлен глыбовыми лавовыми потоками, лавобрекчиями и туфовым горизонтом дацитового состава.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определения концентраций микро- и макроэлементов в гидротермально-метасоматически измененных породах рудно-магматических систем проводились в ЦКП «ИГЕМ - АНАЛИТИКА» методами РФА (на спектрометре последовательного действия РВ-2400); методом ICP MS (на масс-спектрометре XII ICP-MS Thermo Spectroscopy); и инструменталь-

ным нейтронно-активационным анализом (ИНАА) в ИГЕМ РАН с определением содержания ряда элементов со следующими пределами обнаружения (в г/т): K, Ca, Fe, Sr, Rb, Zr, Ba, Sn – 100–1000; Cr, Zn, Br, Ga, Ge, Cd, Mo, Ag, W, Re – 10–100; Na, As, Cs, Sb, Ta, Th, U – 1–5; Co, Au – 0.1–0.5. Состав ассоциаций жильных минералов в метасоматически измененных породах изучался методом термогравиметрического анализа на приборе OD102 (ИГЕМ РАН) и рентгено-фазового анализа на дифрактометре Rigaku D/Max.-2200 на CuK α излучении с монохроматором в интервале углов 2 θ и 3–90°. Составы сульфидных минералов и самородных металлов определены на микроанализаторе «Camebax SX-50» фирмы «Cameca» и на сканирующем электронном микроскопе JEOL-scanning JSM-5300 с системой Link ICIS SATW в ИГЕМ РАН. Для оценки температур образования рудной минерализации и составов растворов были изучены флюидные включения (ФВ) в минералах из экструзивных тел, вторичных кварцитах и гейзеритах. Микротермометрия, в интервале температур от -196 до +600 °C, проводилась на термокриокамере «Linkam-THMSG 600» (Англия) с длиннофокусным объективом 80 $\times$ фирмы «Olympus» (Япония), а микроскоп фирмы «Karl Zeiss Jena», оснащенный видеокамерой. Температуры и фугитивность O $_2$ при формировании парагенезисов рудных минералов оценивались с использованием титаномagnetитового геотермометра Баддингтона-Линдсли [10, 15] и термометрических уравнений, использующих распределение Co между пиритом, халькопиритом и пирротинном, а также халькопиритом и пирротинном в ассоциации с пиритом [13].

РУДНО-МАГМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КЮКЮРТЛЮ (РМСК)

РМСК расположена в Ю-З части вулканической постройки Эльбруса. В ее строении участвуют вулканы раннего и позднего этапов кальдерной стадии, прорванные дацитовой экструзией, внедрившейся в жерло вулкана Кюкюртлю (пра-Эльбрус), с которой пространственно ассоциируют поля развития площадной (монтмориллонит + карбонат + гематит + гетит $\pm$ пирит) и локальной (галлуазит + каолинит + халцедоновидный кварц + карбонат + пирит + марказит + гематит $\pm$ натрозорит) аргиллизации. Участок локальной аргиллизации каолинит-галлуазитового типа расположен в центральной части «стены Кюкюртлю» с экструзией и ориентирован вдоль тектонического нарушения ССВ простирания, к которому приурочены и вторичные кварциты. В пределах РМСК выявлены геохимические аномалии As, Zn и Pb, в 5 и более раз превышающие кларковые величины содержания для этих элементов в кислых породах. Аномалия As площадная (вариации содержаний от 15 до 322 г/т) и выходит за границы экструзии. Аномалии Pb, Zn более локальны и приурочены к вторичным кварцитам. Содержания Zn варьируют от 100 до 497 г/т,

Pb – от 2–3 до 378 г/т.

Установлены повышенные (до 2,8 г/т) содержания Au в пиритизированных зонах. Рудные минералы в экструзии и в зонах вторичных изменений представлены ильменитом, магнетитом, рутилом, гематитом, пиритом, марказитом, пирротинном и редко халькопиритом, сфалеритом и галенитом

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД

В метасоматически измененных дацитах экструзии Кюкюртлинской РМС установлены повышенные содержания (в г/т): Mo (8,8–9,2); Ba (510–621); Ce (83,6–90,1); Sm (5,6–7,1); Sb (3,8–9,0); а в единичных пробах Zn (114–167). Породы кальдерной стадии, прорываемые экструзивными телами, характеризуются высокими (от первых до десятков кларковых величин) содержаниями Ag, Se, Mo, Hf, As, Sb, Zn, Ba и повышенными (1,5–2,0 кларковых величин [2]) содержаниями Ni, Sc, Cs, Co, Cr. Породы посткальдерной стадии в меньшей мере обогащены теми же элементами, однако содержания Mo, Sb и Co в них выше. Дациты, слагающие самое крупное экструзивное тело (купол) КРМС, претерпели гидротермально-метасоматические изменения. Порода зеленовато-серого цвета, а на участках развития зон дробления, с интенсивным проявлением окварцевания и развития глинистых минералов, ее цвет становится зеленовато-бурым. Установлены две генерации биотита. Крупные реликтовые зерна ранней генерации замещаются полевым шпатом, кварцем и цоизитом совместно с ильменитом. Более мелкие чешуйки биотита второй генерации обычно окружены узкими опацитовыми каемками магнетита. Вкрапленники кварца катаклазированы, корродированы и содержат каплевидные включения, заполненные минералами основной массы, по которым развивается агрегат ильменита и сульфидов. Порфиоровые вкрапленники плагиоклазов двух генераций сосюритизированы, а мегакристы кали-натрового полевого шпата каолинизированы. Рудная минерализация ассоциирует, в первую очередь, с процессами окварцевания и локализована в маломощных зонах катаклаза. Часто она приурочена к сложно ветвящимся прожилкам без жильного заполнения, к миароловым пустоткам (миндалинам) или же метасоматически развивается по основной массе породы и порфиоровым вкрапленникам породообразующих минералов (вплоть до образования полных псевдоморфоз).

В экзоконтактах с породами кальдерной стадии



Рис. 2. Экструзия видна в центре «стены Кюкюртлю» (верховья реки Уллу-Хурзук). Фото А.Г. Гурбанова

экструзивные тела имеют фельзитовую структуру основной массы, что может указывать на перекристаллизацию магмы в условиях снижения температуры. Это предположение подтверждается наличием в породе различных генераций полевых шпатов, образовавшихся в процессе снижения температур при их кристаллизации. В перекристаллизованных экструзивных телах появляется генерация плагиоклаза (An_{25-30}) с шахматным строением агрегатов, находящаяся в ассоциации с кали-натровым полевым шпатом ($Or_{68}Ab_{32}$). Судя по составам, они образовались в интервале температур 650–750 °С (начало постмагматической кристаллизации водонасыщенных магм при небольших давлениях). Последующие изменения как экструзивных тел, так и вмещающих их пород связаны с развитием аргиллизации, представленной двумя фациями: «фоновой» ассоциацией монтмориллонит + тридимит (→ кристобалит) + гематит + гетит ± карбонат ± пирит, имеющей площадное развитие, и ассоциацией галлуазит (каолинит ?) + тридимит (→ кристобалит → халцедоновидный кварц) + карбонат ± натропирозит. В ядерных частях экструзивных тел (КРМС, а также в истоках рек Уллу-кам, Бийтик-Тебе) наблюдаются полностью окварцованные породы с обильной прожилково-вкрапленной гематит-пиритовой минерализацией. Этот тип изменений обычно контролируется разрывными нарушениями и четко выделяется на местности благодаря желто-красной окраске. Заключительный этап изменений связан с развитием минерализации состава кальцит + доломит + арагонит + сапонит + натролит + пирит + марказит, частично или полностью заполняющей миароловые пустотки в экструзивных телах. Отметим, что карбонаты, связанные с развитием процесса аргиллизации, отвечают по составу сидеритам-магнетитам и резко отличаются от карбонатов (кальцит и доломит), входящих в состав минерализации, заполняющей миароловые пустотки.

Таблица 1

Составы сульфидных минералов (в мас. %) в экструзии Кюкюртлю

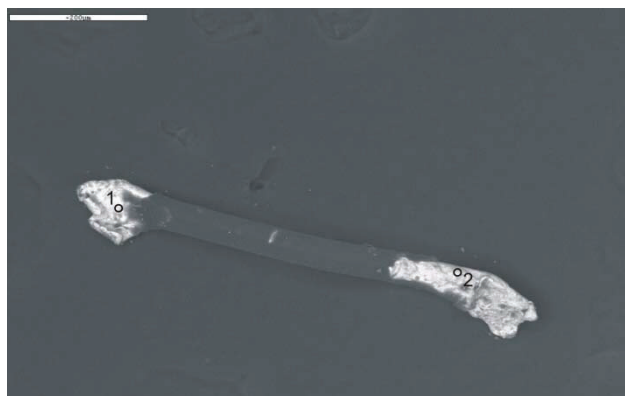
Обр.	Минерал	As	S	Fe	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Сумма	Формула
116	Пирит (оторочка вокруг (Chr-Po) срастания)	0,08	53,64	45,44	0,05	0,06	0,04	0	0,01	99,32	FeS _{2,03}
116	Пирит (в срастании с Chr и Po)	0	52,82	45,64	0,02	0,49	0,27	0,29	0,01	99,56	FeS _{2,03}
119	Пирит (нарас-тает на стенки пор)	0	53,94	45,52	0	0,08	0,02	0,06	0,04	99,66	FeS _{2,03}
119	То же	0,03	52,99	46,10	0,02	0	0,05	0,03	0,03	99,27	FeS _{2,03}
119	Пирит (в оторочке поры)	0	54,04	45,99	0,01	0	0	0	0,02	100,06	FeS _{2,03}
49	Пирит (в срастании с марказитом)	0,05	52,73	46,35	0	0,01	0,04	0,06	0,01	99,25	FeS _{1,94}
111	То же	0	52,98	45,95	0,01	0,05	0,00	0	0,03	99,02	FeS _{2,03}
111	Пирит (из оторочки магнетита)	0	53,05	45,98	0,07	0	0	0,10	0	99,20	FeS _{2,03}
119	Пирит (просечки во вкрапленнике кварца)	0	49,28	41,13	0,16	0,02	0,06	0	0	90,65	FeS _{2,13}
119	Пирит (просечки в породе)	0	53,85	45,55	0	0	0,07	0	0	99,47	FeS _{2,03}
111	Марказит (таблитчатые включения в пирите)	0,16	52,79	46,16	0,06	0	0,05	0,02	0	99,24	FeS _{2,03}
111	То же	0	53,05	46,11	0,01	0,02	0	0	0	99,22	FeS _{2,03}
49	Марказит (в срастании с пиритом)	0	54,05	45,50	0	0	0,04	0	0	99,59	FeS _{2,03}
116	Пирротин (каплевидное включение в кварце)	0,04	38,1	60,5	0,05	0,04	0,23	0,12	0	99,08	Fe _{0,92} S
116	То же	0	38,27	58,84	0,05	0	0,39	0,56	0,03	98,14	Fe _{0,89} S
116	Пирротин (совместно с халькопиритом)	0,04	39,25	59,23	0,04	0,20	0,36	0	0	99,12	Fe _{0,85} S
116	То же	0,07	39,18	59,52	0,03	0,22	0,47	0	0	99,49	Fe _{0,89} S
116	Халькопирит совместно с пирротинном)	0,06	34,65	30,32	0,02	0,03	0	33,7	0,23	99,01	CuFeS ₂
116	То же	0,09	34,75	30,59	0,01	0,02	0	3,83	0,18	99,44	CuFeS ₂

Рудная минерализация проявилась в несколько стадий и является телескопированной, что подтверждается данными рентгено-спектрального анализа рассеянной вкрапленности рудных минералов из образцов, взятых из лавовых потоков ЭВЦ. Были установлены: пирит (стехиометрического состава, а также Ni-, Co-, Ni-Cu-пирит), пирротин (также Ni-, Co-пирротин), арсенопирит, халькопирит, миллерит, самородные медь, свинец, олово и железо (некоторые его частицы обогащены Mn и Cr), магнетит, ильменит, а также органическое вещество (установлено в сростаниях с самородной медью) (табл. 1, рис. 3).

В дацитах экструзии Кюкюртлю (КРМС) сульфидные минералы (пирит, пирротин, халькопирит) имеют также стехиометрический состав (таблица №1), в чем обнаруживается сходство с сульфидами из пород кальдерной стадии. Они заметно отличаются от сульфидных минералов посткальдерной стадии, где, помимо минералов стехиометрического состава, заметную роль играют пириты и пирротины, обогащенные Co, Ni, иногда Cu, вплоть до миллерита. Для пиритов из пород посткальдерной стадии нередко устанавливается зональное строение кристаллов, например, в образце из дацитов Малкинского лавового потока центральные части зерен обогащены Co, а на краях он не обнаружен. Охарактеризованные выше особенности состава рудной минерализации отражают картину наложения ореола пиритизации, связанного с эволюцией гидротермальной системы КРМС, на породы кальдерной стадии и самостоятельное развитие более поздней минерализации в породах посткальдерной стадии.

Ниже приводится характеристика ассоциаций рудных минералов из метасоматически измененных дацитов КРМС в последовательности ее формирования. Оксиды титана и железа (ильменит, магнетит и замещающий их лейкоксен) являются наиболее ранними минералами, как акцессорными (магматогенными), так и метасоматически наложенными на основную массу породы и порфиновые вкрапленники биотита. Крупные кристаллы ильменита обычно корродированы, катаклазированы и замещаются лейкоксом. Иногда ильменит и рутил наблюдаются в виде включений в более поздних пирит-марказитовых агрегатах. Сульфидные микровключения пирротина и халькопирита магматического генезиса устанавливаются в порфиновых вкрапленниках кварца, плагиоклаза, в магнетите и ильмените (рис. 4). Подобные микровключения типичны для плиоцен-четвертичных вулканитов Кавказа, в том числе и для дацитов Эльбруса [11] и являются весьма информативными при определении физико-химических параметров кристаллизации пород. В акцессорных магнетитах установлены повышенные содержания (в г/т): Cr (931–1148); Co (89–148); Zn (406–495); Mo (8,9–18,5); Sb (1,9–9,8); Ce (105–129); Ta (3,0–9,2) и W (2,5–4,7).

а)



б)

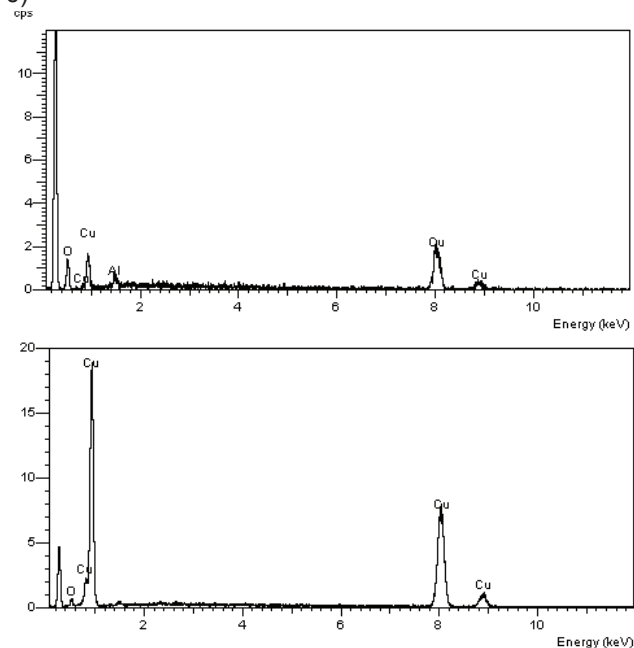


Рис. 3. а – снимок частицы обр. 631/1 (дациты Кизилкольского лавового потока): центральная темная часть частицы – калиевый полевой шпат, края – самородная медь; **б** – результаты анализов, полученные на Link ICIS SATW: вверху – область 1 (на графике левый пик – углерода), внизу – область 2

Пирит-марказитовая ассоциация, преобладающая среди рудных минералов, метасоматически развивается по порфировым вкрапленникам биотита или по тонкопористой основной массе породы. В первом случае морфология зерен игольчатая (развивается по спайности биотита, часто совместно с более ранними изометричными или таблитчатыми зернами титаномагнетита), а во втором – сульфиды образуют ажурные агрегаты вокруг вкрапленников порообразующих минералов, либо рассеянную вкрапленность метазерен и метакристаллов, изредка содержащих игольчатые включения пирротина поздней генерации. Данная ассоциация характеризуется повышенными содержаниями (в г/т): Zn (50–132); Co (23–48).

В порах (кавернах – бывших газовых пузырьках размером до 0,3–4,0 см в поперечнике) дацитовой экструзии КРМС сульфиды и нерудные минералы (кварц, гипс и др.) образуют корочки по стенкам, вплоть до полного их заполнения (в частично заполненных порах сульфиды замещаются гидроксидами железа). Участки породы в непосредственной близости от миароловых пустоток калишпатизированы и насыщены мельчайшей вкрапленностью сульфидных минералов. Микронзондовыми исследованиями минералов из заполнений миароловых пустот в дацитах крупного экструзивного тела КРМС установлена следующая последовательность нарастания минералов на стенки пор: кварц + пирит + марказит → халцедон нескольких генераций → гипс, ярозит (развивающийся по пириту), сульфатные минералы. В метасоматических оторочках пор, на фоне поздней калишпатизации породы, развиваются пирит и марказит. При этом сульфиды и магнетит часто образуют сфероидальные агрегаты, что характерно для близповерхностных месторождений, где минералообразование происходило из газовых конденсатов при повышенном давлении флюидов в микрообъемах замкнутых систем [3]. В породах с кавернами установлены повышенные содержания (в г/т): Ag (до 9,3); Au (0,017–0,8); Zn (до 17); As (31–194); Ba (462–647); Sb (2,5–11,8). Кроме того, сульфиды развиваются также и по невыдержанным тонким, без жильного заполнения, ветвящимся трещинкам катаклаза в породе, и очень редко они образуют эвгедральные агрегаты кристаллов в более мощных кварцевых прожилках. Наиболее крупные пирит-марказитовые агрегаты обычно наблюдаются в экзоконтактах кварцевых прожилков, где встречаются кубические метакристаллы пирита со слабо развитой гранью октаэдра и копьевидные кристаллы-ромбоэдры марказита. Установлено, что сульфиды не только сопровождают, но и корродируются кварцем более поздней генерации. По сульфидам железа развиваются гематит и ярозит, по халькопириту – ковеллин (поздняя гипергенная минерализация).

Самородные минералы и галенит образуют мельчайшую пылевидную вкрапленность единичных зерен размером 10–30 мкм, тяготеющую к маломощным зонам окварцевания пород, кварцевым прожилкам. Они отмечены также в марказите и порфирировых вкрапленниках кварца и плагиоклаза. Наиболее часто блестки самородных металлов встречаются в окварцованных и гематитизированных обломках породы, где они приурочены к трещинкам практически без жильного заполнения, как на краях, так и внутри обломков (рис. 5).

В пределах КРМС встречаются зоны развития вторичных кварцитов, часто с богатой вкрапленностью сульфидов. Вторичные кварциты являются продуктом окварцевания, гематитизации и пиритизации исходных вулканических пород. Рентгено-структурным анализом в них, кроме α -кварца и гипса, впервые был установлен жарчихит, что

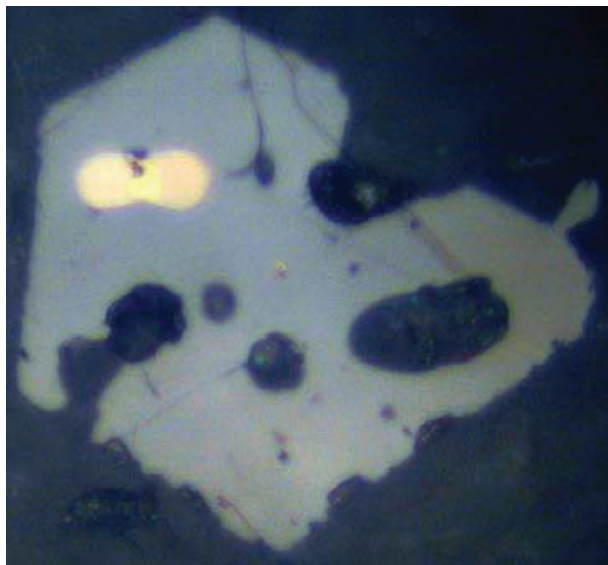


Рис. 4. Акцессорная рудная минерализация в дацитах экструзии КРМС (обр. 119–3/99). Халькопирит-пирротиновые микровключения в магнетите. Ширина кадра 0,3 мм

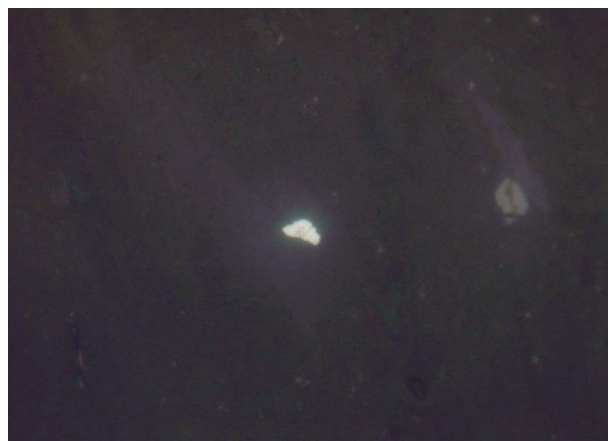


Рис. 5. Лапчатое выделение белого изотропного рудного минерала в окварцованных дацитах КРМС Кюкюрютлю (обр. 105/99). Ширина поля зрения 0,9 мм

свидетельствует о существенно фторидном характере гидротермально-метасоматических процессов. Мелкие кубические метакристаллы пирита образуют шаровидные скопления (фрамбоиды, расположенные изолированно друг от друга) и веретенообразно распределенные агрегаты. Кроме фрамбоидов, пирит образует рассеянную вкрапленность кубических и кубооктаэдрических кристаллов в кварце. В ассоциации с пиритом редко встречается марказит. Гематит развивается по пириту (содержит его реликты, либо образует полные псевдоморфозы). На отдельных участках, в поле развития вторичных кварцитов отмечены пиритовые «линзы» и «кокарды», являющиеся, скорее всего, бывшими порами и обломками замещенных кварцем эффузивных пород. Гематит развит преимущественно в более пористых участках породы, а

реликтовый пирит сохраняется в кварце. Во вторичных кварцитах установлены повышенные содержания (в г/т): Cu (16–33); Zn (451–497) и пониженные Ba (39–48). Мощность зон вторичных кварцитов составляет первые десятки метров, а их протяженность – первые сотни метров.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОСТМАГМАТИЧЕСКОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ И ПРОЯВЛЕНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ РУДОНОСНЫХ ПРОЦЕССОВ

Фугитивность кислорода и температуры кристаллизации лавовых потоков Эльбрусского вулканического центра, оцененные по магнетит-ильменитовому парагенезису (табл. 2, рис. 6), в целом возрастают в соответствии с последовательностью их излияния.

Кроме того, установлено, что первичные флюидные включения (ФВ) во всех изученных образцах имеют двухфазный состав (газ + раствор), а их размеры обычно не превышают 15 мкм (иногда достигают 30–35 мкм). Газовая фаза ФВ не превышает 20 % объема вакуолей (табл. 3).

В двухфазных ФВ, обнаруженных во вкраплениях кварца из апикальной части экструзивного тела КРМС (они трассируют залеченные трещины, т. е. являются вторичными), на газовую фазу приходится не более 10 % от их объема. Температура их гомогенизации оценена в 139–145 °С, а основным компонентом растворов является $MgCl_2$ при концентрации растворов 20,5 мас. % экв. NaCl (средне соленые). В зернах кальцита (их размер менее 1 мм в поперечнике) из карбонатного прожилка, на-

ходящегося в верхней обнажающейся части экструзии, изучены первичные двухфазные ФВ (размер 10–15 мкм) с газовой фазой около 15 % от их объема. Основным компонентом растворов является NaCl с небольшой примесью гидрокарбонатов или сульфатов при их концентрации 3,23–3,5 мас. % экв. NaCl. Температура гомогенизации включений составляет 168,6–171 °С. В мелкозернистом кварце из прожилков, находящихся во вторичных кварцитах, обнаружены только очень мелкие (менее 10 мкм) ФВ, и по ним удалось определить лишь температуру их гомогенизации, которая составила 110–115 °С.

ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗОВАНИЯ АССОЦИАЦИЙ СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ

Температуры образования халькопирит-пирит-пирротинового парагенезиса были рассчитаны по термометрическим уравнениям, использующим распределение кобальта между пиритом и пирротин, халькопиритом и пирротин в ассоциации с пиритом [13].

В таблице № 4 приведены результаты расчета температуры образования гидротермально-метасоматической сульфидной минерализации из верхов средней и нижней частей Малкинского потока (соответственно обр. 28-а/98 и 29-в/98), а также из дацитов экструзии Кюкюртлинской РМС (обр. 116/99, рис. 7).

Для ЭВЦ температуры составили 156 °С (дациты средней части Малкинского лавового потока), 275 °С (дациты нижней части Малкинского лавового

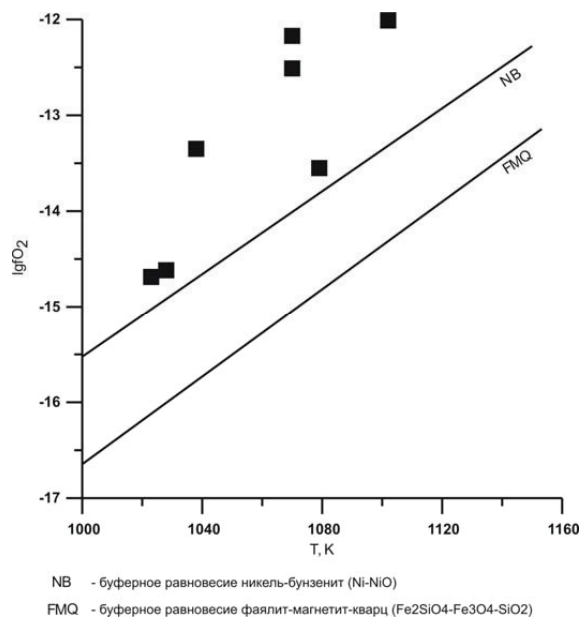


Рис. 6. Диаграмма $\lg fO_2$ -T, иллюстрирующая окислительные условия и температуры кристаллизации лавовых потоков Эльбрусского вулканического центра

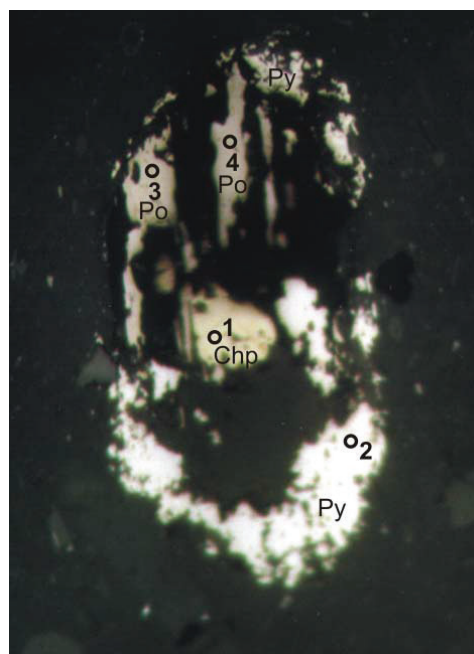


Рис. 7. Дациты экструзии КРМС. Микрофотография образца 116/99 с точками микрозондового анализа. Халькопирит-пирротин-пиритовое заполнение каверны в дацитах. Py – пирит, Po – пирротин, Chp – халькопирит. Объектив 16×. Увеличение 420×

Таблица 2

**Температуры и фугитивность кислорода при образовании
пирит-магнетитового парагенезиса**

Образец (точки анализа)	T, °C	-lgfO ₂ при 1 атм	-lgfO ₂ при 1000 атм
Кальдерная стадия. Поздний этап. Дацинты лавового потока р. Бийтик-Тебе.			
19 (IL1-МТ1)	755	-14.630	-14.617
19 (IL2-МТ2)	745	-14.770	-14.757
Среднее	750	-14.700	-14.687
Посткальдерная стадия. Ранний этап. Дацинты лавового потока ледник Малый Азау (обр. 28, 34) и основания Малкинского потока (обр. 44).			
28 (IL1-МТ1)	769	-13.583	-13.571
28 (IL2-МТ3)	761	-13.140	-13.128
Среднее	765	-13.362	-13.350
34 (IL1-МТ1)	823	-12.092	-12.081
34 (IL3-МТ3)	831	-11.990	-11.980
34 (IL2-МТ2)	832	-11.984	-11.973
Среднее	829	-12.022	-12.011
44/1 (IL1-МТ2.2)	829	-11.931	-11.921
44/1 (IL1.1-МТ1)	792	-12.019	-12.007
44/1 (IL3-МТ1)	782	-12.415	-12.403
44/1 (IL2-МТ1)	783	-12.367	-12.355
Среднее	797	-12.183	-12.172
Среднее для раннего этапа посткальдерной стадии	797	-12.522	-12.511
Посткальдерная стадия. Поздний этап. Трахидацинты лавового потока с восточной вершины вулкана Эльбрус.			
340 (IL-МТ)	806	-13.563	-13.551

Таблица 3

Температуры гомогенизации и состав флюидных включений из эпитермальных образований Эльбурского вулканического центра

№ обр.	Минерал	n		T _{пл.э}	T _{пл.льда}	T _{пл}	T _г	C	Состав растворов
147-1	кварц	5	?	фазовые переходы не наблюдались			+110/+115		
14/00	кварц	6	В	-33,4/-33,5	-17/-17,4		+139/+145	20,22/20,5	MgCl ₂
1/00	карбонат	10	П	-21,4/-21,6	-1,9/-2,1	+2,1/+3	+168,6/+171	3,23/3,55	NaCl>90%, (примеси гидрокарбонатов или сульфатов)
30-2	халцедон ?	5	?	фазовые переходы не наблюдались			+120/+140	-	-
221-3, 221-4	кварц	6	В	-21,5/-23,4	-3,0/-10,3		+127/+152	5,0/14,2	NaCl, (KCl<10%)

Примечания к таблице: n – количество измеренных включений; T_{пл.э} – температура эвтектики, °C; T_{пл} – температура плавления последних кристаллов клатратов, °C; T_г – температура гомогенизации включений, °C; C – концентрация растворов, мас.% экв. NaCl; П – первичное включение; В – вторичное включение. Гео-логические привязки приведены в тексте.

потока), для экструзии Кюкюртлинской РМС температура оценивается в 191 °C.

Ирикская РМС расположена в восточной части вулканической постройки Эльбруса в районе перевала Ирик-чат и на 80 % была перекрыта (данные на 2009 г.) ледником. В строении ее обнажающейся части участвуют породы вулканического цоколя и игнимбриты раннего этапа кальдерной стадии, прорванные малоомощными дайками фельзит-порфи-ров риодацитового, дацитового и риолитового составов с вкрапленностью пирита. На породы наложены процессы аргиллизации и выщелачивания. В пределах ИРМС были выявлены геохимические аномалии Mn, Zn, Pb, Sb, U, Cs, Mo и As. Максимальные содержания установлены в зонах вторичных изменений, которые, как и дайки фельзит-порфи-ров, имеют ССВ простирающие и выполнены бурими, охристыми или светлыми порошковатыми и пленочными образованиями. По данным PCA, в измененных породах присутствуют альбит, гётит, гематит, гипс, гаусманит, шеелит, англезит и смитсонит. Установлено, что в метасоматически измененных породах ИРМС содержания (в г/т) Zn варьируют от 87 до 3116, As – от 2,6 до 257,7, Sb – от 44 до 1419, Pb – от 72 до 690, Mo – от 4,8 до 63. В дайках отмечено повышенное содержание золота (до 0,023 г/т). В породообразующем кварце из даек риолитового состава установлены повышенные концентрации (в г/т) Zn = 13, Mo = 1.5, La = 1.11, Ce = 2.37.

Из-за слабой обнаженности пока не представляется возможным оценить потенциальную рудо-

носность ИРМС. Однако, с учетом глобального потепления, приведшего к интенсивному таянию ледников на Кавказе (в том числе и в районе ИРМС), мы планируем провести в пределах ставшей более обнаженной ИРМС сбор дополнительного представительного каменного материала, комплексное петрохимическое и минералого-геохимическое изучение которого поможет оценить потенциальную рудоносность ИРМС и подготовить отдельную публикацию.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наличие аргиллизитов, сформированных при постмагматической эволюции Кюкюртлинской рудно-магматической системы (КРМС), свидетельствует о том, что в современном эрозийном срезе вскрыта лишь верхняя часть гидротермально-метасоматической колонны измененных пород в пределах КРМС. Этот тип изменений обычно происходит при участии значительной доли (80–95 %) метеорных вод. Породы с высоким содержанием сульфатов (алунит, ярозит и др.) являются довольно обычной фацией аргиллизитов. Сера в них, как правило, имеет магматический источник. Появление сульфатной минерализации может быть связано с окислением постмагматических флюидов при их взаимодействии с метеорными водами. Появление метасоматитов с высокими содержаниями серы могло быть связано с процессами неоднократного вскипания флюидов.

Таблица №4

Температуры образования гидротермально-метасоматической сульфидной минерализации Эльбрусского вулканического центра

Дациты Малкинского лавового потока		
Обр. (Точки анализа)	K _{Co} (Po-Py)	T, °C
28-а/98 (3 – 2)	6,208494208	156
29-в/98 (3 – 1.1)	0,744097297	271
29-в/98 (3 – 1.2)	0,663151196	279
Дациты экструзии Кюкюртлинской РМС.		
Точки анализа	K _{Co} (Po-Chp)	T, °C
116/99 (1.1 – 3)	3,412685013	213
116/99 (1.2 – 3)	5,164612527	177
116/99 (1.1 – 4)	3,735663082	204
116/99 (1.2 – 4)	5,653393817	170
Среднее		191

Примечание. Температуры образования халькопирит-пирит-пирротинового парагенезиса были рассчитаны по термометрическим уравнениям, использующим распределение кобальта [13] между: пиритом (Py) и пирротинном (Po): $T, ^\circ\text{C} = 1000 / [0,538 \cdot \lg K_{\text{CoPo-Py}} + 1,907] - 273$; халькопиритом и пирротинном в ассоциации с пиритом: $T, ^\circ\text{C} = 1000 / [0,92 \cdot \lg K_{\text{CoPo-Chp}} + 1,568] - 273$.

Как было показано выше, в пределах КРМС, в современном эрозионном срезе (по вертикали на 800 м и по латерали на 2 500 м), широко проявлены автометасоматические и метасоматические изменения, как самой экструзии, так и вмещающих ее дацитовых лавовых потоков кальдерной стадии. В верхней части разреза расположена зона аргиллизитов с пиритом, марказитом, алунином, ярозитом и резко повышенными концентрациями бария, сформировавшаяся при температурах 120–180 °C и имеющая площадной характер развития при мощности в первые сотни метров. Выявлены две фации аргиллизитов: с монтмориллонитом (низко сульфидные и безсульфатные) и с галлуазитом (высоко сульфидные и сульфатсодержащие), отвечающие фронтальным (слабо кислые) и внутренним (сильно кислые) частям гидротермальной системы. Следующие этапы изменения пород в пределах КРМС проявились в более нижних частях разреза, вскрытого эрозией, и представлены зонами развития миароловой минерализации (кальцит-доломит-арагонит-сапонит-натролит-пирит-марказит) и вторичных кварцитов (окварцевание, гематизация и пиритизация исходных вулканитов).

В.И. Коваленко с соавторами [6], рассматривая физико-химические параметры образования рудоносных гранитоидов, провели комплексное изучение флюидных включений в минералах из рудных тел эндогенных месторождений Sn, W, Be, Ta, Mo и Au. Было установлено, что температуры гомогенизации для продуктивной стадии рудообразования варьируют от 150 до 400 °C при низких концентрациях растворов, составляющих 8–10 мас.% экв. NaCl, и их преимущественно фторидном составе.

Гидротермальные растворы, участвовавшие в метасоматических изменениях пород КРМС и сформировавшие вторичные кварциты, также имели фторидный состав и температуры порядка 140–170 °C при низких концентрациях растворов, составляющих 3,5–14 мас. % экв. NaCl. О фторидном составе растворов свидетельствуют впервые обнаруженные в этих метасоматитах рентгено-структурным анализом фторсодержащие минералы: жарчит, ральстонит, α-ральстонит и флюорит.

Температуры гомогенизации флюидных включений в кварце из апикальной части экструзии КРМС и в секущих ее карбонатных прожилках составляют 139–145 °C и 168–171 °C при концентрации растворов до 20,5 и 3,2–3,5 мас. % экв. NaCl, соответственно. Эти данные могут свидетельствовать о возможном наличии в пределах КРМС, под зоной

аргиллизитов, рудной минерализации (Cu-Mo, Au-Ag-As, Pb-Zn), связанной с экструзивными телами кислого состава (дациты). Это предположение косвенно подтверждается резко повышенными концентрациями Zn, Pb, Mo, Cu, Th, Ag, As, Ce, La в породообразующем кварце из экструзии дацитового состава в пределах КРМС [5]. Помимо этого, о наличии на глубине фанеритового штока гранодиоритового состава могут свидетельствовать многочисленные ксенолиты гранодиоритов, обнаруженные в вулканитах кальдерной стадии развития ЭВЦ.

Геологически близкая картина наблюдается в Чили в пределах пояса Марикунга (Maricunga), где месторождения благородных металлов порфирового типа связаны с миоценовыми вулканами андезитового и андезидацитового составов. Au-Ag месторождения приурочены к штокам диорит-гранодиоритового состава, а эпитеральные месторождения – к вмещающим их гидротермально-метасоматически измененным вулканитам [24]. Для месторождений рудного пояса Марикунга (Марте, Вали, Санта Сесилия, Ла Пепа и др.) характерно то, что промышленное Au-Ag оруденение перекрывается мощной (до 400–600 м) аргиллизитовой «шляпой». Важно отметить, что, как и в нашем случае, там породы, претерпевшие изменения аргиллизитовой фации, обогащены пиритом, алунином и содержат самородную медь и энаргит. Проведенная реконструкция порфирировых систем предполагает [24], что богатые золотом штокверки образовались на глубинах 600–1 000 м от палеоповерхности.

ВЫВОДЫ

1. По составу и текстурно-структурным признакам выявленная рудная минерализация может быть отнесена к медно-порфировому генетическому типу.
2. По аналогии с порфировыми типами месторождений Чили и на основании полученных нами геохимических и минералогических данных: в вулканитах КРМС и ЭВЦ установлены резко повышен-

ные содержания Ag, Cu, Mo, Zn, Pb, As, Sb, Se и Ba; по масштабности и площадному характеру развития процесса аргиллизации можно предположить возможность обнаружения в зоне пропилитизации, на глубинах 400–600 м от современного эрозионного среза КРМС, Pb-Zn оруденения в приразломных кварц-алунитовых жилах, а на более глубоких уровнях – штокверков с Au-Ag, Cu или Cu-Mo оруденением верхней части порфировой рудно-магматической системы.

Благодарность. Работа выполнена в рамках Базовой темы лаборатории Петрографии ИГЕМ РАН «Петрология магматических комплексов для реконструкций геодинамических режимов формирования Восточно-Европейского кратона» ЕГИСУ НИОКТР (регистрационный № 124022400143-9) и при финансовой поддержке НИОКТР КНИО ВНЦ РАН (регистрационный № 122041100269-2)

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатиков О.А., Гурбанов А.Г. Комплексные исследования Эльбрусского и Казбекского вулканических центров: мониторинг и прогноз // Вестн. Владикавказского научн. центра РАН. 2003. Т. 3. № 2. С. 15–28.
2. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–557.
3. Гамаян Г.Н., Жданов Ю.Я., Сыромятникова А.С. Состав и структурные особенности сфероидов из золоторудных месторождений Восточной Якутии // Записки ВМО. 1999. № 5. С. 71–76.
4. Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Докучаев А.Я., Газеев В.М., Абрамов С.С., Грознова Е.О., Шевченко А.В. Проявление рудных гидротермально-метасоматических процессов в районе Эльбрусского вулканического центра (Северный Кавказ, Россия) // Геология рудных месторождений. М. 2008. Т. 50. № 3. С. 225–245.
5. Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Газеев В.М., Лексин А.Б. Гурбанова О.А. Результаты геохимического изучения породообразующих кварцев из вулканитов ЭВЦ и их интерпретация // Вестник ВНЦ РАН. 2022. Т. 22. № 4. С. 62–72.
6. Коваленко В.И., Наумов В.Б., Богатиков О.А. Потенциальная рудоносность кислых магматических пород // 27 МГК. Петрология / Секция С.09: Доклады. Т. 9. – М.: Наука, 1984. С. 94–103.
7. Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Попов В.С. Медно-порфировые месторождения мира. – М.: Недра, 1986. 236 с.
8. Науменко В.В. Вулканизм и вулканогенное оруденение. – Киев: Препринт ИГФМ, 1987. 65 с.
9. Новейший и современный вулканизм на территории России. (Автор. колл. Лавров Н.П., Добрецов Н.Л., Богатиков О.А. Гурбанов А.Г. и др.). – М.: Наука, 2005. 604 с.
10. Полтавец Ю.А. Обсуждение титаномагнетитового геотермометра Баддингтона-Линдсли на основе сравнительного анализа равновесий шпинелидов магнетитовой серии // Известия АН СССР. Сер. геол. 1975. № 6. С. 63–72.
11. Попов В.С., Федоров Б.В. Сульфидные микровключения в плиоцен-четвертичных вулканических породах Кавказа // Геохимия. 1995. № 3. С. 386–403.
12. Таусон Л.В., Гундобин Г.М., Зорина Л.Д. Геохимические поля рудно-магматических систем. – Новосибирск: Наука, 1989. 216 с.
13. Урусов В.С., Таусон В.Л., Акимов В.В. Геохимия твердого тела. – М.: ГЕОС, 1997. 500 с.
14. Brathwaite R.L., Simpson M.P., Faure K., Skinner D.N.B. Telescoped porphyry Cu-Mo-Au mineralization, advanced argillic alteration and quartz-sulphide-gold-anhydrite veins in the Thames District, New Zealand // Mineralium Deposita. 2001. V. 36. P. 623–640.
15. Buddington A.F., Lindsley D.H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents // J. Petrol. 1964. V. 5. № 2. P. 310–357.
16. Lang J.R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding // Mineralium Deposita. 2001. V. 36. P. 477–489.
17. Lipman P.W. Volcano-tectonic setting of Tertiary ore deposits in the Southern Rocky Mountains // Frizona Geol. Soc. Dig. 1981. V. 14. P. 199–211.
18. Lipman P.W. The Miocene Questa caldera, northern New Mexico: Relation to batholith emplacement and associated molybdenum mineralization // Proc. Denver Region Explor. Geol. Soc. Symp. 1983. P. 133–147.
19. Lipman P.W., Bogatikov O.A., Tsvetkov A.A., Gazis C., Gurbanov A.G., Hon K., Koronovsky N.V., Kovalenko V.I., Marchev P. 2.8 Ma ash-flow caldera at Chegem River in the northern Caucasus Mountains (Russia), contemporaneous granites, and associated ore deposits // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1993. No 57. P. 85–124.
20. Oyarzun R., Marquez A., Lillo J., Lopez I., Rivera S. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism // Mineralium Deposita. 2001. V. 36. P. 794–798.
21. Rice C.M., Harmon R.S., Shepherd T.J. Central City, Colorado: The Upper Part of an Alkaline Porphyry Molybdenum System // Economic Geology. 1985. V. 80. № 7. P. 1769–1796.
22. Sillitoe R.H. Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources: Houston, Texas, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series. Chapter 22. Copper Deposits and Andean Evolution. 1989. V. 11. P. 285–311.
23. Sillitoe R.H. Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration // Mineralium Deposita. 2002. V. 37. P. 4–13.
24. Vila T., Sillitoe R.H. Gold-rich porphyry systems in the Maricunga Belt, Northern Chile // Economic Geology. 1991. V. 86. P. 1238–1260.

REFERENCES

1. Bogatikov O.A., Gurbanov A.G. Kompleksnyye issledovaniya El'brusskogo i Kazbekskogo vulkanicheskikh centrov: monitoring i prognoz // Vestn. Vladikavkazskogo nauchn. centra RAN. 2003. T. 3. № 2. S. 15–28.
2. Vinogradov A.P. Srednee soderzhanie himicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh gornyykh porod zemnoy kory // Geokhimiya. 1962. № 7. S. 555–557.

3. Gamyranin G.N., Zhdanov Yu.Ya., Syromyatnikova A.S. Sostav i strukturnye osobennosti sferoidov iz zolotorudnykh mestorozhdenij Vostochnoj Yakutii // *Zapiski VMO*. 1999. № 5. S. 71–76.
4. Gurbanov A.G., Bogatkov O.A., Dokuchaev A.Ya., Gazeev V.M., Abramov S.S., Groznova E.O., Shevchenko A.V. Proyavlenie rudnykh gidrotermal'no-metasomaticheskikh processov v rajone El'brusskogo vulkanicheskogo centra (Severnyj Kavkaz, Rossiya) // *Geologiya rudnykh mestorozhdenij*. M. 2008. T. 50. № 3. S. 225–245.
5. Gurbanov A.G., Dokuchaev A.Ya., Gazeev V.M., Leksin A.B., Gurbanova O.A. Rezul'taty geohimicheskogo izucheniya porodooobrazuyushchih kvarcev iz vulkanitov EVC i ih interpretaciya // *Vestnik VNC RAN*. 2022. T. 22. № 4. S. 62–72.
6. Kovalenko V.I., Naumov V.B., Bogatkov O.A. Potencial'naya rudonosnost' kislykh magmaticheskikh porod // *27 MGK. Petrologiya / Sekciya S.09: Doklady*. T. 9. – M.: Nauka, 1984. S. 94–103.
7. Krivcov A.I., Migachev I.F., Popov V.S. Medno-porfirovye mestorozhdeniya mira. – M.: Nedra, 1986. 236 s.
8. Naumenko V.V. Vulkanizm i vulkanogennoe orudnenie. – Kiev: Preprint IGFM, 1987. 65 s.
9. Novejsij i sovremennij vulkanizm na territorii Rossii. (Avtor. koll. Laverov N.P., Dobrecov N.L., Bogatkov O.A. Gurbanov A.G. i dr.). – M.: Nauka, 2005. 604 s.
10. Poltavec Yu.A. Obsuzhdenie titanomagnetitovogo geotermometra Baddingtona-Lindsli na osnove sravnitel'nogo analiza ravnovesij shpinelidov magnetitovoj serii // *Izvestiya AN SSSR. Ser. geol.* 1975. № 6. S. 63–72.
11. Popov V.S., Fedorov B.V. Sul'fidnye mikrovklyucheniya v pliocen-chetvertichnykh vulkanicheskikh porodakh Kavkaza // *Geohimiya*. 1995. № 3. S. 386–403.
12. Tauson L.V., Gundobin G.M., Zorina L.D. Geohimicheskie polya rudno-magmaticheskikh sistem. – Novosibirsk: Nauka, 1989. 216 s.
13. Urusov V.S., Tauson V.L., Akimov V.V. Geohimiya tverdogo tela. – M.: GEOS, 1997. 500 s.
14. Brathwaite R.L., Simpson M.P., Faure K., Skinner D.N.B. Telescoped porphyry Cu-Mo-Au mineralization, advanced argillic alteration and quartz-sulphide-gold-anhydrite veins in the Thames District, New Zealand // *Mineralium Deposita*. 2001. V. 36. P. 623–640.
15. Buddington A.F., Lindsley D.H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents // *J. Petrol.* 1964. V. 5. № 2. P. 310–357.
16. Lang J.R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding // *Mineralium Deposita*. 2001. V. 36. P. 477–489.
17. Lipman P.W. Volcano-tectonic setting of Tertiary ore deposits in the Southern Rocky Mountains // *Frizona Geol. Soc. Dig.* 1981. V. 14. P. 199–211.
18. Lipman P.W. The Miocene Questa caldera, northern New Mexico: Relation to batholith emplacement and associated molybdenum mineralization // *Proc. Denver Region Explor. Geol. Soc. Symp.* 1983. P. 133–147.
19. Lipman P.W., Bogatkov O.A., Tsvetkov A.A., Gaziz C., Gurbanov A.G., Hon K., Koronovsky N.V., Kovalenko V.I., Marchev P. 2.8 Ma ash-flow caldera at Chegem River in the northern Caucasus Mountains (Russia), cotemporaneous granites, and associated ore deposits // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1993. No 57. P. 85–124.
20. Oyarzun R., Marquez A., Lillo J., Lopez I., Rivera S. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism // *Mineralium Deposita*. 2001. V. 36. P. 794–798.
21. Rice C.M., Harmon R.S., Shepherd T.J. Central City, Colorado: The Upper Part of an Alkaline Porphyry Molybdenum System // *Economic Geology*. 1985. V. 80. № 7. P. 1769–1796.
22. Sillitoe R.H. Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources: Houston, Texas, Cirum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series. Chapter 22. Copper Deposits and Andean Evolution. 1989. V. 11. P. 285–311.
23. Sillitoe R.H. Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration // *Mineralium Deposita*. 2002. V. 37. P. 4–13.
24. Vila T., Sillitoe R.H. Gold-rich porphyry systems in the Maricunga Belt, Northern Chile // *Economic Geology*. 1991. V. 86. P. 1238–1260.

