НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 528.:551.21
DOI 10.46698/VNC.2024.57.30.001

Пневматолитовый тип рудной минерализации в пределах Эльбрусского вулканического центра (Северный Кавказ, Россия)

Анатолий Георгиевич Гурбанов
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Лаборатория петрографии, ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, г. Москва; Владикавказский научный центр Российской академии наук, Комплексный научно-исследовательский отдел, ведущий научный сотрудник, Россия, Владикавказ, ag.gurbanov@yandex.ru

Виктор Магалимович Газеев
ИГЕМ РАН, Лаборатория петрографии, научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, г. Москва; Владикавказский научный центр Российской академии наук, Комплексный научно-исследовательский отдел, старший научный сотрудник, Россия, Владикавказ, gazeev@igem.ru

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

Андрей Виленович Жариков
ИГЕМ РАН, заместитель директора по научной работе, Лаборатория радиогеологии и радиогеоэкологии, ведущий научный сотрудник, доктор технических наук, Россия, Москва, andreyzharikov@yandex.ru

Андрей Владимирович Мохов
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), Лаборатория геохимии наночастиц, ведущий научный сотрудник, доктор геолого-минералогических наук, Москва

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

Алексей Борисович Лексин
ИГЕМ РАН, Лаборатория геоинформатики, специалист, Россия, Москва, lexin@igem.ru

Ольга Александровна Гурбанова
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, ассистент кафедры минералогии и кристаллохимии, кандидат химических наук, Россия, Москва, gur_o@mail.ru

Аннотация. *В приповерхностных магматических камерах «спящего» вулкана Эльбрус, кроме традиционных видов дегазации расплава (через фумарольную активность, паразитические кратеры и зоны разломов), выявлен еще один ее вид, при котором она происходит за счет повышенной проницаемости вулканитов и через микротрещины в породах, перекрывающих магматические камеры. Его наличие доказано петрофизическими данными о плотности, пористости и проницаемости вулканических пород ЭВЦ и данными о периодическом образовании над камерами аэрозольных «облаков», «столбов» ярко белого свечения (в солнечную погоду) и потоков водорода. Оценены скорости прохождения газов (H_2O, H_2, He, CO_2, CO, $S_{общ.}$, HF, HCl) через гнейсы и вулканические породы. Проекции магматических камер на земную поверхность показаны в виде устойчивых положительных тепловых аномалий, выявленных при специальной обработке данных ночного теплового зондирования с системы спутников NOAA. Под аномалиями, по данным магнитотеллурического зондирования и гравиметрических исследований, выявлены эндогенные источники тепла в виде магматических камер с расплавом. Глубины залегания их кровель варьируют от 2 до 4 км. Над современными активными разломами с зонами повышенной микротрещиноватости, расположенными в контурах положительных тепловых аномалий, периодически возникают «столбы» с ярко белым свечением, а по данным ночной лидарной и водородной съемок установлены аэрозольные «облака» и потоки водорода. В контурах тепловых аномалий периодически происходит интенсивное таяние снежно-ледового покрова и ощущается запах сероводорода. Изучены геохимические особенности различных видов дегазации и оценены масштабы переноса газами микроэлементов и вещества. Установлено, что дегазация расплава сопровождалась переносом газами ряда микроэлементов (Li, B, Si, P, S, Ca, Zn, Pb, Mo, Ba, W, Hg, Pt, Ag, U, Th, I) в тонкодисперсном (первые мкм) состоянии, при активном участии F и Cl. При электронно-микроскопическом изучении сухого остатка проб снега впервые в Приэльбрусье установлены: самородная платина, барит, галит, сильвин, опал, синджарит, циркон, халькопирит, полевые шпаты, хлормайенит, гипс, сванбергит, Cl-органика и др. Выявлен новый для новейших вулканитов Кавказа тип «невидимой» рудной минерализации, генетически связанный с дегазацией обогащенного рудными элементами расплава, и высказано предположение о возможности его обнаружения в палео- и современных вулканически активных областях.*

Ключевые слова: *вулкан Эльбрус, пневматолитовый тип оруденения, микротрещиноватость, проницаемость пород, геохимические особенности лав*

Для цитирования: *Гурбанов А.Г., Газеев В.М., Докучаев А.Я., Жариков А.В., Мохов А.В., Лексин А.Б., Гурбанова О.А. Пневматолитовый тип рудной минерализации в пределах Эльбрусского вулканического центра (Северный Кавказ, Россия) // Вестник Владикавказского научного центра РАН. 2024. Т. 24. № 3. С. 45–59. DOI 10.46698/VNC.2024.57.30.001.*

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

Pneumatolytic type of ore mineralization within the Elbrus volcanic center (North Caucasus, Russia)

Anatoly G. Gurbanov
Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Laboratory of petrography, PhD, Leading Researcher; Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Complex research department, PhD, Leading Researcher, Russia, Moscow, ag.gurbanov@yandex.ru

Victor M. Gazeev
IGEM RAS, Laboratory of petrography, Researcher; Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Complex research department, Senior Researcher, PhD, Russia, Vladikavkaz, gazeev@igem.ru

Alexander Y. Dokuchaev
IGEM RAS, Leading Researcher, Head of the Ore-Petrographic Sector-Museum, PhD,
alexandre-dokuchayev@yandex.ru

Andrey V. Zharikov
IGEM RAS, Deputy director of IGEM RAS for research, laboratory of radiogeology and radiogeoecology, PhD, Leading Researcher, andreyzharikov@yandex.ru

Andrey V. Mokhov
Dr. V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences (GEOKHI RAS), Laboratory of Nanoparticle Geochemistry, PhD, Leading Researcher, Russia, Moscow

Elena O. Groznova
IEMRAS,Laboratory of нydrothermalprocesses, PhD, Russia, Chernogolovka

Alexey B. Lexin
IGEM RAS, laboratory “Geoinformatics” workshop, specialist, Russia, Moscow, lexin@igem.ru.

Olga A. Gurbanova
Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Faculty of geology, Department of Mineralogy and Crystalchemistry, assistant, PhD, Russia, Moscow, gur_o@mail.ru

Abstract. *In the near-surface magma chambers of the "sleeping" volcano Elbrus, in addition to the traditional types of degassing of the melt (through fumarole activity, parasitic craters and fault zones), another type was revealed in which it occurs due to the increased permeability of volcanic rocks and through microcracks in the rocks overlying the magma chambers. Its presence is proved by a petrophysical data on the density, porosity and permeability of volcanic rocks of the EVC and data about the periodic formation of aerosol "clouds", "pillars" of bright white glow (in sunny weather) and hydrogen flows above the chambers. Estimated passage rates of gases (H_2O, H_2, He, CO_2, CO, S_{total}, HF, HCl) through gneisses and volcanic rocks.The projections of the magma chambers onto the Earth's surface are shown as stable positive thermal anomalies revealed by special processing of nighttime thermal sounding data from the NOAA satellite system. Under the anomalies, according to magnetotelluric sounding and gravimetric studies, endogenous heat sources were identified, in the form of magma chambers with a melt.The depths of their roofs vary from 2 to 4 km. Over modern active faults with zones of increased microfracturing, located in the contours of positive thermal anomalies, “pillars” with a bright white glow periodically appear, and according to night lidar and hydrogen surveys, aerosol “clouds” and hydrogen flows have been established.In the contours of thermal anomalies, intensive melting of the snow and ice cover periodically occurs and the smell of hydrogen sulfide is felt. The geochemical features of various types of degassing have been studied and the extent of transfer of microelements and substances by gases has been estimated.It has been established that the degassing of the melt was accompanied by the transfer of a number of trace elements (Li, B, Si, P, S, Ca, Zn, Pb, Mo, Ba, W, Hg, Pt, Ag, U, Th, I) by gases in finely dispersed (a few microns) state, with the active participation of F and Cl. During the electron microscopic study of the dry residue of snow samples, for the first time in the Elbrus region, the following were established: native platinum, barite, halite, sylvin, opal, sinjarite, zircon, chalcopyrite, feldspars, chlormayenite, gypsum, svanbergite, Cl-organic, etc. A new one forthe type of "invisible" ore mineralization in the latest volcanic rocks of the Caucasus, genetically associated with the degassing of a melt enriched in ore elements, and it has been suggested that it can be found in paleo- and modern volcanically active areas.*

Keywords: *Elbrus volcano, pneumatolytic type of mineralization, microfracturing, rock permeability, geochemical features of lavas*

For citation: *Gurbanov A.G., Gazeev V.M., Dokuchaev A.Y., Zharikov A.V., Mokhov A.V., Leksin A.B., Gurbanova O.A. Pneumatolytic type of ore mineralization within the Elbrus volcanic center (North Caucasus, Russia) // Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2024. Vol.24. No. 3, P.45–59.*
DOI 10.46698/VNC.2024.57.30.001.

Acknowledgments. *The work was carried out within the framework of the Basic topic of the Laboratory of Petrography of IGEM RAS "Petrology of magmatic complexes for reconstructions of geodynamic regimes of the formation of the East European craton" (Registration number EGISU R&D 124022400143-9) and with the financial support of the R&D Department of VSC RAS (registration number 122041100269-2).*

ВВЕДЕНИЕ

В пределах Эльбрусского вулканического центра (ЭВЦ) и Эльбрусской кальдеры были выделены Кюкюртлинская (КРМС) и Ирикская (ИРМС) рудно-магматические системы с гидротермально-метасоматическим типом оруденения [7, 10] и широко распространенные в пределах ЭВЦ мелкие по размерам низкотемпературные проявления гейзерит-опалитового типа [3]. С кальдерными комплексами (Сан Хуан, Квеста, Вэллис, Медисин Лейк, Лонг Вэлли, Сильвер Бэлл, Портал, Гризли Пик, Лейк Сити и др.) исследователи [25, 26 и др.] связывают до 60 % рудных месторождений, расположенных на западе США. Формирование этих месторождений связывается с конкретными вулкано-плутоническими комплексами и сопровождается широким развитием процессов окварцевания, аргиллизации, пропилитизации. В плейстоцен-голоценовых вулканитах ЭВЦ, близких по составу и геодинамической обстановке формирования к чилийским стратовулканам с секущими их субвулканическими порфировыми штоками, также широко проявлены (в пределах КРМС и ИРМС) наложенные позднемагматические изменения (окварцевание, аргиллизация, пропилитизация и др.) как вмещающих вулканитов, так и секущих их штоков. С этими структурами в Чили связан ряд крупных медно-порфировых, медно-молибден-порфировых и золоторудных месторождений в вулканическом поясе Марикунга [27, 28, 29]. Для месторождений этого типа характерно неравномерное распределение и относительно низкие концентрации меди, молибдена и невидимого золота. При низких содержаниях золота, но больших объемах руды, месторождения такого типа 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 = 1 200, Mo = 7.1; месторождение Рефугио с запасами Au до 194 тонн при средних содержаниях Au = 0.96, Cu = 800, Mo = 29.

РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ПРЕДЕЛАХ ЭЛЬБРУССКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

Гидротермально-метасоматический тип оруденения. Рудная минерализация в пределах КРМС ассоциирует, в первую очередь, с процессами окварцевания; она локализована в маломощных зонах катаклаза. Однако часто рудная минерализация приурочена к сложно ветвящимся прожилкам без жильного заполнения («зияющим»), а также к миароловым пустоткам (миндалинам), либо метасоматически развивается по основной массе породы и порфировым вкрапленникам породообразующих минералов (вплоть до образования полных псевдоморфоз). Нами впервые были выявлены самородные железо, медь, свинец, олово, а также неправильной формы (в виде «проволочек») выделения, представленные сплавами окислов железа со свинцом и оловом. Важно отметить, что наиболее часто мельчайшие «блёстки» самородных металлов встречаются в окварцованных породах, где они приурочены к трещинкам практически без жильного заполнения. Вполне вероятно, что такие самородные металлы транспортировались только газовой фазой – из расплава в приповерхностной магматической камере к земной поверхности по зонам повышенной трещиноватости (по «зияющим» микротрещинкам, не имеющим жильного заполнения).

Важно отметить, что сульфиды и магнетит часто образуют сфероидальные агрегаты, что характерно для приповерхностных месторождений, где минералообразование происходило из газовых конденсатов при повышенном давлении флюидов в микрообъемах замкнутых систем [4]. Сульфиды развиваются также и по невыдержанным тонким, без жильного заполнения, ветвящимся трещинкам катаклаза в породе. 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.

Микрозондовыми 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 нередко сульфиды и магнетит образуют сфероидальные агрегаты. Следовательно, в формировании рудной минерализации в пределах КРМС значительную роль играли гидротермально-метасоматические процессы.

Гейзерит-опалитовая минерализация. Известно, что формирование месторождений гейзерит-опалитового типа происходило близко от поверхности земли из газовых эксгаляций и термальных растворов в вулканических поясах. Оцененные параметры формирования такого типа оруденения следующие: температура до 300 °С; давление до 20 атм; растворы кислые или слабощелочные; температура фумарол, сольфатар и паровых струй падает от 600–1 000 °С сразу после извержения вулкана до 330–200–100 °С через 3–5 лет [14]. В гейзеритах рентгеноструктурным анализом установлены α-кварц, кристобалит, тридимит, редко альбит и в значительных количествах фторсодержащие минералы (жарчихит, ральстонит,

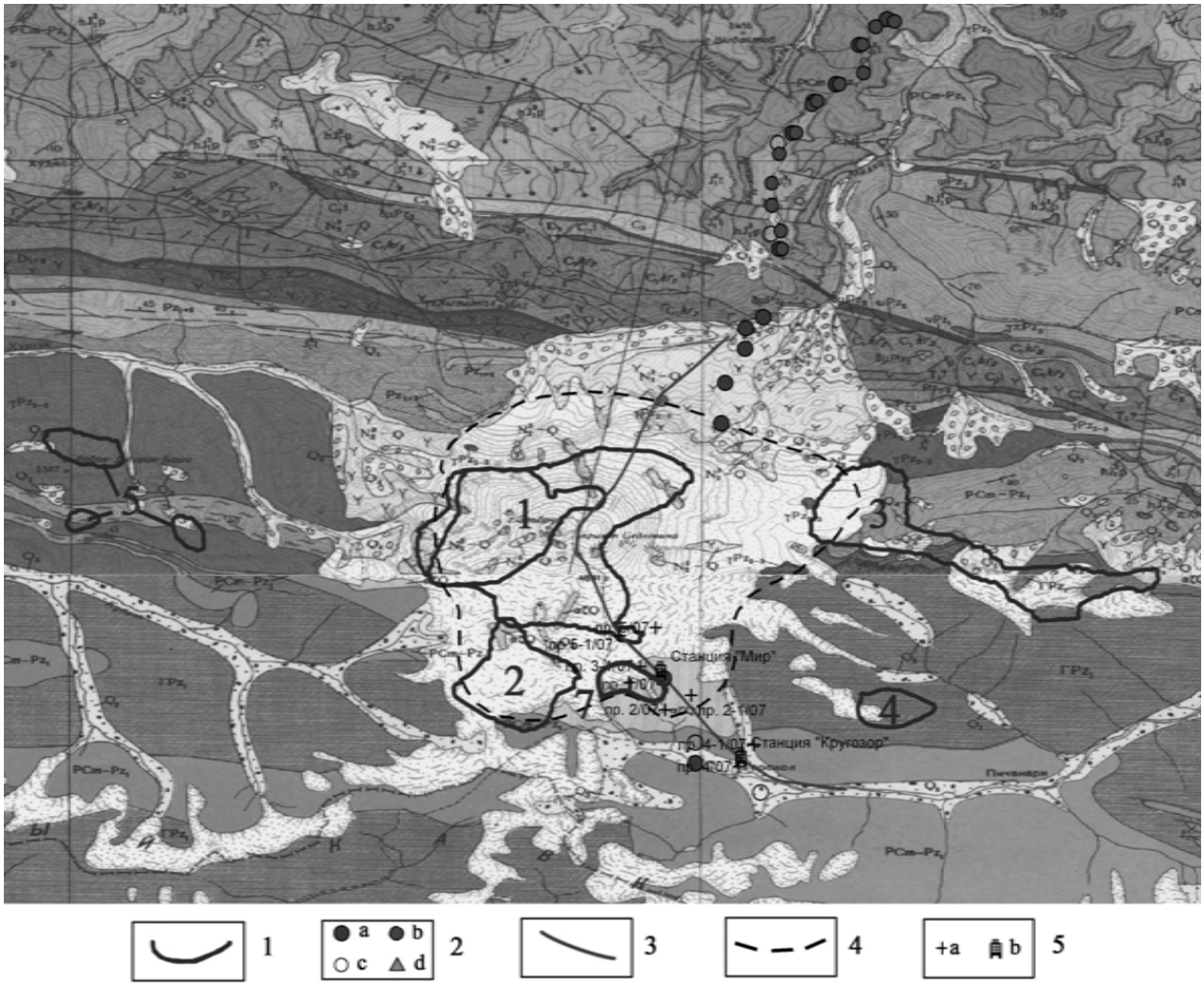

Рис. 1. **Карта положительных тепловых аномалий (1997–2007 гг.) с учетом результатов геологических и геофизических исследований**

Условные обозначения: 1 – тепловая аномалия и ее номер; 2 – линия аудиомагнитотеллурического и магнитного профилей; 3 – границы кальдеры достоверные; 4 – границы кальдеры предполагаемые; 5 – фумаролы и места отбора проб снега для геохимических и минералогических исследований и их номера. Составлена А.Г. Гурбановым, О.В. Ляшенко и А.Б. Лексиным

α-ральстонит), реже флюорит, что свидетельствует о фторидном характере термальных растворов. Доказано [14], что в формировании гейзерит-опалитового типа оруденения, кроме газовых эксгаляций, в большей мере участвовали термальные растворы.

Пневматолитовый тип рудной минерализации. Под пневматолитовым происхождением понимается [5]: «Образование материалов при участии газовой фазы (летучих, выделившихся из магмы) как в смысле прямого отложения (возгонки) или взаимодействия газов, так и в смысле воздействия газов на ранее существовавшие материалы (пневматолитический метасоматоз). Пневматолитовое происхождение неправильно приписывалось многим материалам, содержащим легко летучие компоненты (например, фтор), хотя последние большей частью участвуют в процессе не в газообразующей фазе, а в водных растворах. Путем пневматолиза из магмы выносятся многие металлоиды, образующие месторождения полезных ископаемых. Некоторые исследователи считают, что пневматолитовые месторождения почти аналогичны контактово-метасоматическим месторождениям. Пнематоморфный – то же, что и пневматолитический».

При проведении комплексных минералого-геохимических исследований в пределах тепловых аномалий на поверхности вулканической постройки Эльбруса были установлены следующие интересные факты:

1). В 350 м севернее станции канатной дороги «Мир», в части голоценового лавового потока дацитового состава (проба № 1-1/07), залегающей в контуре «маленькой» интенсивной тепловой аномалии № 4 (*рис. 1*), фиксирующейся на ночных тепловых космических снимках с системы спутников NOAA,

Рис. 2. **Столб свечения над зоной разлома в контуре тепловой аномалии № 2, ледник Малый Азау, напротив станции канатной дороги «Мир». Фото Л.Е. Цукановой**

за период с 1997 по 2007 гг., были установлены резко повышенные концентрации (в г/т): Zn = 507, Pb = 296, Cu = 94, Sb = 28, Ba = 627 и (в масс. %): F = 0.26, Cl = 0.17 и S = 0.09. В пробе дацита из этого же голоценового лавового потока (проба № 1-2/07), но в 600 м вниз по его падению от южного края «маленькой» тепловой аномалии № 4, установлены уже резко пониженные величины концентраций (в г/т): Zn = 58, Pb = 34, Cu = 11, Sb = 2.1, Ba = 409 и (в масс. %): F = 0.06, Cl = 0.02 и S = 0.011. При этом важно отметить, что в результате петрографического изучения пород проб № 1-1/07 и № 1-2/07 установлено, что породы этих проб не претерпели никаких видимых наложенных гидротермально-метасоматических изменений, с которыми можно было бы связать аномально высокие концентрации рудных и летучих элементов в пробе № 1-1/07 и пониженные концентрации этих же элементов при отсутствии микротрещин в породе из пробы № 1-2/07.

2). Проба № 3-2/07 взята из дацитового лавового потока верхненеоплейстоценового возраста, в пределах тепловой аномалии № 2 (*рис. 1*), выявленной по данным обработки ночных тепловых космических снимков (за 1997–2007 гг., полученных с системы спутников NOAA). Проба взята в 150 м южнее станции канатной дороги «Мир» (левый борт ледника Малый Азау), в месте появившегося в 2006 г. «столба» ярко-белого свечения (*рис. 2*), приуроченного к зоне повышенной трещиноватости, фиксирующейся в виде малоамплитудного разлома на космоснимках [8, 9] только с сентября 2006 г., т. е. со времени своего образования. В пробе № 3-2/07 из дацитового лавового потока установлены повышенные концентрации (в г/т): Zn = 225, Pb = 83, Cu = 46, Sb = 3.8, Ba = 623 и (в масс. %): F = 0.32, Cl = 0.08 и S = 0.05. В пробе № 3-3/07 из этого же дацитового лавового потока, но за пределами тепловой аномалии № 2 (в 700 м от южной границы этой тепловой аномалии и ниже по его падению) установлены следующие концентрации (в г/т): Zn = 45, Pb = 12, Cu = 8, Sb = 0.4, Ba = 472 и (в масс. %): F = 0.075, Cl = 0.02 и S = 0.011.

3). В верхненеоплейстоценовом дацитовом лавовом потоке (проба № 22/11), залегающем под голоценовым потоком (проба № 1-1/07), обнажающимся в контурах положительной тепловой аномалии № 4, методом мокрой химии в лаборатории ИГЕМ РАН (аналитик О. Г. Унанова) были установлены очень высокие для лав ЭВЦ содержания (в масс. %): ZnO = 0.35, PbO = 0.23, Sb_2O_3 = 0.14, BaO = 0.19, F = 0.11, Cl = 0.14. При микроскопическом изучении аншлифов из этой пробы рудные минералы не были обнаружены, но при электронно-микроскопических исследованиях были выявлены зерна (размер 8–12 мкм) самородных свинца, цинка и сурьмы. Важно отметить, что при петрографическом изучении в пробе № 22/11 не наблюдалось даже следов наложенных гидротермально-метасоматических изменений, с которыми обычно связывают образование рудной минерализации. На продолжении этого же лавового потока, но за пределами контура тепловой аномалии № 4, повышенные содержания Zn, Pb, Sb, Ba, F и Cl не выявлены. Эти данные свидетельствуют об установлении переноса газами минеральных фаз в тонкодисперсном состоянии при участии F и Cl и их отложении в межзерновом пространстве породообразующих минералов за счет повышенной проницаемости дацитов, а также в микротрещинках породы. Следовательно, этот пневматолитовый тип рудной минерализации генетически связан с дегазацией обогащенного рудными элементами и газами расплава, находящегося в приповерхностной магматической камере, и поэтому может быть обнаружен и в других вулканически активных областях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе приведенных выше данных важно было понять, как и за счет чего иногда возникали довольно высокие концентрации ряда рудных элементов в породах, которые не затронуты процессами наложенных гидротермально-метасоматических изменений. Ответы на эти вопросы были получены после детальных геологических, дистанционных, петрофизических и минералого-геохимических исследований вулканитов. Ранее [8, 9] было показано, что резко повышенное содержание ряда рудных и редких элементов в лавовых потоках Эльбруса связано с дегазацией расплава в приповерхностных магматических камерах и сопровождалось проявлением, в разных масштабах, гидротермальных процессов, приводивших к формированию рудопроявлений и рудно-магматических систем. В приведенных выше трех случаях мы предполагаем,

что перенос ряда минералов и металлов (частицы микронной размерности) происходил газовой фазой, а путями их транспортировки могли быть: повышенная проницаемость пород и новообразованная зона повышенной трещиноватости, к которой был приурочен «столб» ярко белого свечения. Предполагаемые формы и пути переноса ряда металлов из расплава в современных активных вулканах иллюстрируются на примере выноса газами самородного рения и других металлов при дегазации расплава в жерле активного вулкана Кудрявый на Курилах. В наших случаях резко повышенные концентрации ряда металлов на участках голоценового и позднеплейстоценового лавовых потоков дацитового состава, расположенных над современными приповерхностными магматическими камерами с расплавом, вполне могло иметь пневматолитовое происхождение. Например сульфиды, развивающиеся по невыдержанным тонким, без жильного заполнения, ветвящимся трещинкам катаклаза в дацитах КРМР (*рис. 3)*.

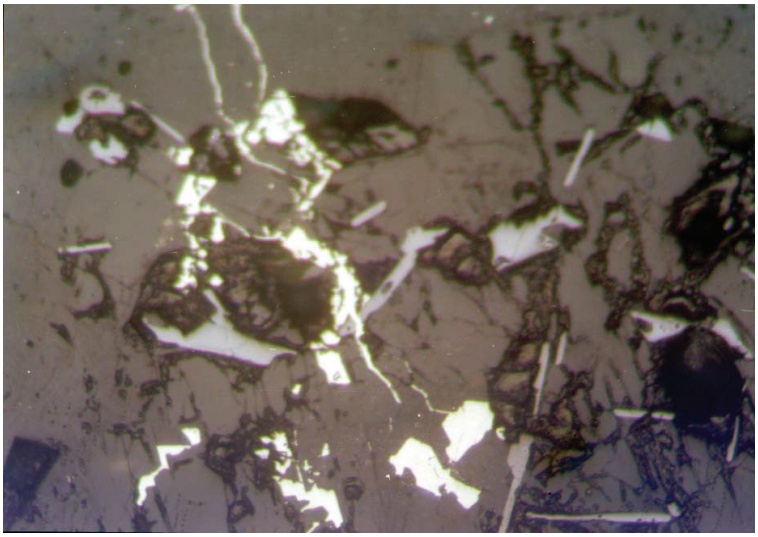

Рис. 3. **Рудная минерализация в дацитах Кюкюртлинской рудно-магматической системы (КРМС, обр. № 105/99): трещинки катаклаза, залеченные пиритом (белый). Трещинки пересекают порфировые вкрапленники, на которые ранее был метасоматически наложен ильменит (его иголочки, голубовато-серого цвета, секутся по трещинкам катаклаза пиритовыми просечками). Диагональ кадра 1.2 мм**

Для оценки возможности выноса газовой фазой при дегазации газонасыщенного расплава в приповерхностных магматических камерах вулкана Эльбрус [13] тонкодисперсных частиц ряда минералов и самородных металлов был отобран и петрофизическими методами изучен представительный каменный материал. Он охарактеризовал все выделяемые стадии и этапы в истории развития ЭВЦ [8, 9, 16].

При выяснении принципиальной возможности дегазации расплава через поры и зоны микротрещиноватости в породах были изучены плотность (ρ, г/см^3), пористость (Ø, %) и проницаемость (К, м^2) различных вулканических пород, слагающих ЭВЦ. Результаты этих исследований приведены в *таблице 1* [9].

Плотность и пористость образцов определялись традиционным методом гидростатического взвешивания, проницаемость – нестационарным методом, модифицированным с учетом изменения термодинамических свойств фильтрующегося газа [12]. Показано, что плотность массивных лав больше, чем у пирокластических пород, а пористость и проницаемость – меньше. В пределах каждой из этих групп пород плотность и пористость изменяются незначительно (плотность до 1.3 раза, пористость до 4.7 раза), а изменения проницаемости более существенны: до 5 порядков в массивных лавах и до 3 порядков – в пирокластических породах. Среди массивных лав очень низкие значения пористости и проницаемости установлены у докальдерных трахиандезитов; низкие значения проницаемости, при высокой пористости, установлены у андезибазальтов. Этим они резко отличаются от пород кальдерной и посткальдерной стадий развития ЭВЦ [17]. Установлено, что проницаемость пород докальдерной стадии формирования ЭВЦ значительно (на несколько порядков) меньше, чем у пород более поздних стадий. Пористость дацитов изменяется в 4.6 раза (2.3–10.8 %), а проницаемость в 76 раз (1.239E-17 – 2.884E-16 м^2). Значения величин этих параметров разбросаны относительно равномерно в интервале от минимального до максимального. Поэтому приводить их средние значения и дисперсии некорректно. Те же закономерности поведения пористости и проницаемости (изменения пористости в несколько раз, проницаемости – на несколько порядков, а значения параметров разбросаны по всему интервалу) отмечаются у пирокластических пород. Среди них своей аномально низкой проницаемостью выделяются игнимбриты (обр. 635), а низкой пористостью – обр. 33-2/99. Важно отметить, что если исключить эти образцы из выборки, то общая картина не изменится.

Между плотностью и пористостью, как в пределах всей выборки, так и в пределах каждой из групп пород, имеется устойчивая обратная корреляция (величина коэффициента корреляции – 0.90 для 16 пар значений, что, согласно t-критерия Стьюдента, соответствует уровню значимости 0.0002 %) (*рис. 4)*, а корреляция между пористостью и проницаемостью отсутствует. Это свидетельствует о том, что, несмотря на высокие значения пористости, крупные изометричной формы поры, наблюдающиеся в образцах некоторых дацитовых лавовых потоков, на проницаемость массивных лав сильно не влияют, так как она определяется не порами, а

Таблица 1

Плотность, пористость и проницаемость образцов основных типов пород ЭВЦ

Номер образца	Порода	Место отбора	Плотность ($г/см^3$)	Пористость (%)	Проницаемость ($м^2$)
2/99	трахиандезит	р.Худес	2.66	0.82	$3.74 \cdot 10^{-21}$
50/8	андезибазальт	Тызыльская вулканическая постройка	2.48	8.39	$1.65 \cdot 10^{-18}$
22/4	дацит	р. Уллукам	2.51	2.30	$4.92 \cdot 10^{-17}$
31/57	дацит	Голоценовый поток в 200 м выше станции «Мир»	2.40	2.63	$9.50 \cdot 10^{-17}$
66/1-6	дацит	Сылтранская вулканическая постройка	2.38	3.63	$2.88 \cdot 10^{-16}$
197	дацит	-	2.60	5.30	$2.30 \cdot 10^{-17}$
20/99	дацит	Большой Азау	2.40	6.79	$1.77 \cdot 10^{-16}$
54/99	субинтрузивныйдацит	Сылтранская вулканическая постройка	2.10	10.40	$2.63 \cdot 10^{-17}$
22/3	дацит	Уллукам	2.24	10.80	$1.24 \cdot 10^{-17}$
33-2/99	туфобрекчия	Маркирующий уровень рр. Бийтик – Азау	2.38	6.65	$8.22 \cdot 10^{-17}$
635	игнимбрит	Перевал Ирик-чат	2.23	11.00	$6.24 \cdot 10^{-19}$
646	эруптивная брекчия	Перевал Ирик-чат	2.36	15.20	$1.48 \cdot 10^{-17}$
20/97	туф риолитового состава	Левый исток р.Бийтик–Тебе	2.06	21.30	$1.18 \cdot 10^{-15}$
80k II *	игнимбрит	р. Чучхур	1.89	22.30	$2.45 \cdot 10^{-15}$
80k+*	игнимбрит	р. Чучхур	2.04	20.20	$4.32 \cdot 10^{-16}$
25/1	туфобрекчия	р. Уллукам	1.84	23.90	$6.23 \cdot 10^{-17}$

Примечание. *Фильтрация: II – параллельно слоистости, + – перпендикулярно слоистости.*

микротрещинами. Проницаемость же пирокластических пород определяется порами и трещинами. Причины такого поведения пористости и проницаемости, очевидно, зависят от особенностей текстур и микроструктур пород.

Результаты петрофизических исследований были использованы для оценки скоростей фильтрации индивидуальных газов: He, Ar, Cl_2, F_2, H_2S, CO_2, H_2, O_2, H_2O. При расчетах были использованы следующие допущения. Фильтрация в вертикальном направлении, подчиняющаяся закону Дарси [18], происходит через поровое пространство нескольких горизонтальных слоев изотропных пород, значения проницаемости и мощности которых приведены в *таблице 2*.

Для вычислений использованы осредненные значения проницаемости пород ЭВЦ (*таблица 1*), а также результаты определений проницаемости гранитов и гнейсов при высоких PT-параметрах [24]. Флюидное давление равно литостатическому и изменяется по гидростатическому закону от 0.1 МПа на поверхности до 99.7 МПа на глубине 4 000 м [15]. Таким образом, средний градиент давления составляет 0.02 МПа/м. Вязкости индивидуальных газов при соответствующих PT-параметрах взяты из [22]. Из приведенных в *таблице 2* результатов вычислений видно, что основным параметром, определяющим величины скоростей фильтрации, является проницаемость пород. Значения проницаемости пород, слагающих вулканическую постройку Эльбруса, достаточно высокие, поэтому в рассматриваемом разрезе преобладают скорости фильтрации около 10-5 см/с. В средней части разреза находится слой гнейсов, скорости фильтрации в котором на два порядка меньше (~ 10-7 см/с), однако его мощность, очевидно, недостаточна, чтобы оказать существенное влияние на средние скорости фильтрации в разрезе, которые составляют ~ 10-5 см/с. Наибольшие значения скоростей фильтрации отмечаются у H_2, CO_2, H_2O, а у Ar, F_2 – в два раза меньше. Следует отметить, что значения ~ 10-5 см/с характеризуют очень высокие фоновые скорости. Например, результаты компьютерного моделирования формирования рудообразующих систем, контролируемых глубоко проникающим и высоко проницаемым разломом, показали [19], что для образования золоторудных месторождений достаточными могут быть фоновые скорости фильтрации рудоносных флюидов ~ 10–8 см/с. Этими данными полностью доказывается реальность процесса дегазации расплава, находящегося в приповерхностных магматических камерах ЭВЦ,

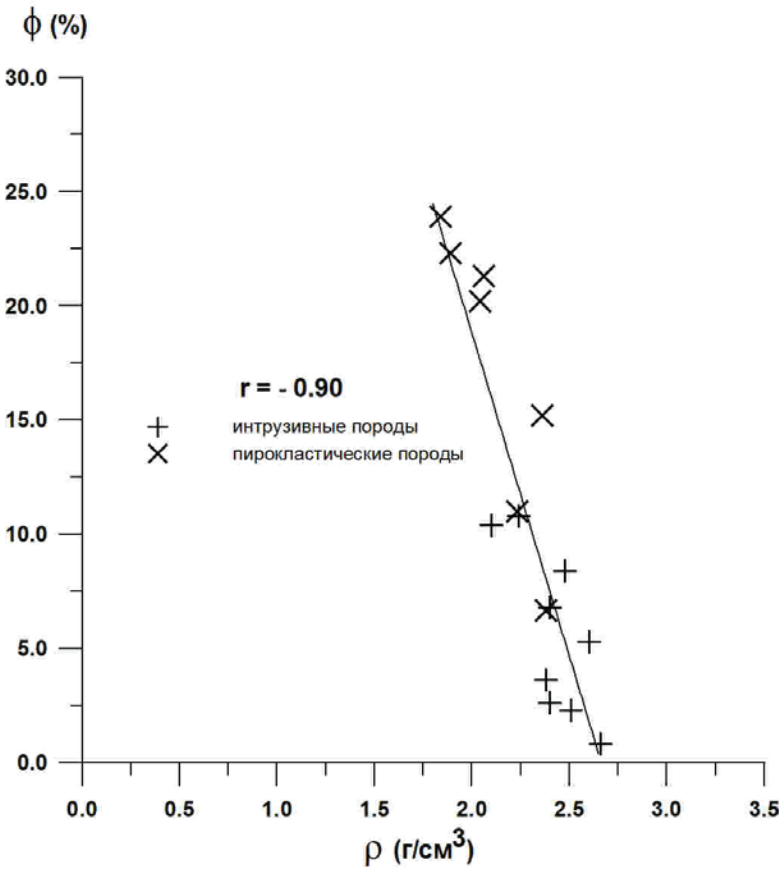

Рис. 4. **Зависимость пористости от плотности образцов основных типов пород ЭВЦ**

осуществляемой благодаря повышенным проницаемости и микротрещиноватости вышележащих вулканических пород и древних гнейсов.

В связи с вышеизложенным отметим, что образцы для изучения петрофизических свойств вулканических пород специально отбирались вдали от зон активных и кальдерообразующих разломов (т. е. зон повышенной проницаемости). Поэтому рассчитанные для них скорости прохождения газов (He, Ar, Cl_2, F_2, H_2S, CO_2, O_2, H_2, H_2O), а следовательно и дегазация, будут значительно ниже, чем в зонах повышенной проницаемости. Этим, скорее всего, объясняется появление «столбов» ярко-белого свечения высотой до 150 м и аномалий водорода над зонами активных разломов.

Результаты петрофизических исследований основных разновидностей вулканических пород ЭВЦ показали их высокую проницаемость для рудоносных флюидов из нижележащих газонасыщенных расплавов приповерхностных магматических камер.

Рассмотрим, как же проявляется эта фильтрация газов.

В пределах ЭВЦ, кроме обычных видов дегазации (через фумарольную активность, паразитические кратеры, зоны активных разломов) газонасыщенного расплава из приповерхностных камер [13],

Таблица 2

Скорости фильтрации индивидуальных газов в основных типах пород разреза ЭВЦ

Породы по разрезу	Мощность (м)	$P_{фл}$ (МПа)	t (°C)	k ($м^2$)	Скорость фильтрации (см/с)							
					He	Ar	Cl_2	F_2	H_2S	CO_2	H_2	O_2	H_2O
туф, туфобрекчии, эруптивная брекчия	150	1.97	21	$3.36 \cdot 10^{-16}$	$3.37 \cdot 10^{-05}$	$2.96 \cdot 10^{-05}$	$7.35 \cdot 10^{-05}$	$2.85 \cdot 10^{-05}$	$5.33 \cdot 10^{-05}$	$6.72 \cdot 10^{-05}$	$7.51 \cdot 10^{-05}$	$3.24 \cdot 10^{-05}$	$7.36 \cdot 10^{-05}$
дациты	1250	19.40	213	$9.58 \cdot 10^{-17}$	$6.77 \cdot 10^{-06}$	$5.10 \cdot 10^{-06}$	$1.30 \cdot 10^{-05}$	$5.51 \cdot 10^{-06}$	$9.21 \cdot 10^{-06}$	$8.98 \cdot 10^{-06}$	$1.51 \cdot 10^{-05}$	$5.84 \cdot 10^{-06}$	$1.11 \cdot 10^{-05}$
игнимбриты	100	36.21	399	$9.61 \cdot 10^{-16}$	-	$4.34 \cdot 10^{-05}$	-	$4.38 \cdot 10^{-05}$	-	$7.48 \cdot 10^{-05}$	$1.28 \cdot 10^{-04}$	$4.66 \cdot 10^{-05}$	-
гнейсы	500	43.68	481	$6.50 \cdot 10^{-16}$	-	$2.44 \cdot 10^{-07}$	-	$2.64 \cdot 10^{-07}$	-	$4.59 \cdot 10^{-07}$	$7.90 \cdot 10^{-07}$	$2.97 \cdot 10^{-07}$	-
граниты	600	57.37	633	$5.00 \cdot 10^{-16}$	-	$1.77 \cdot 10^{-05}$	-	$1.81 \cdot 10^{-05}$	-	$3.66 \cdot 10^{-05}$	$5.41 \cdot 10^{-05}$	$2.03 \cdot 10^{-05}$	$2.79 \cdot 10^{-05}$
средняя скорость фильтрации (см/с)						$1.92 \cdot 10^{-05}$		$1.92 \cdot 10^{-05}$		$3.76 \cdot 10^{-05}$	$4.95 \cdot 10^{-05}$	$2.11 \cdot 10^{-05}$	$3.75 \cdot 10^{-05}$

был выявлен еще один ее вид [8, 9]. Дегазация в этом случае осуществляется за счет высоких проницаемости и микротрещиноватости пород, залегающих в кровлях магматических камер. Этот вывод подтверждается тем, что нами, многочисленными туристами и сотрудниками МЧС Кабардино-Балкарской Республики наблюдались «столбы» яркого белого свечения высотой до 100–150 м над тремя магматическими камерами. Появлялись они в солнечную погоду и наблюдались: в течение 2 часов над тепловой аномалией № 2 (*рис. 2)*; 1.5 часа над поляной Азау *(рис. 5*) в мае 2012 г. ниже первой опоры новой канатной дороги в основании вулканической постройки Эльбруса (здесь, возможно, появилась новая приповерхностная магматическая камера); и около 40 минут под Восточным вершинным кратером Эльбруса (над боккой в контуре положительной тепловой аномалии № 1 на *рис. 1)*.

На земной поверхности проекции магматических камер показаны в виде устойчивых (за 10 лет) положительных тепловых аномалий (*рис. 1*), выявленных в результате специальной обработки ночных тепловых снимков со спутника NOAA [11]. Наличие под аномалиями эндогенных источников тепла (в виде расплава) доказано данными магнитотеллурического зондирования [6, 17] (сопротивление у расплава на 1–2 порядка меньше, чем у кристаллических и вулканических пород) и гравиметрическими исследованиями по профилям (негативные аномалии силы тяжести в 10-15 Мгал (данные А.В. Копаева, ГАИШ МГУ). Глубины залегания кровель этих приповерхностных камер варьируют от 2 до 4 км, а подошв – от 8 до 10 км ниже уровня моря. Температура находящегося в камерах расплава оценена в 1 100–1 170 °С [15, 23] по данным изучения расплавных включений в породообразующих кварце и плагиоклазах. Кроме периодически возникающих над тепловыми аномалиями (в периоды поступления новых порций расплава в магматические камеры) «столбов» яркого белого свечения, над ними образуются аэрозольные «облака» и потоки водорода (данные геолидарной и водородной съемок [1, 2]) (*рис. 6)*. Отметим, что в контурах тепловых аномалий периодически наблюдается интенсивное таяние снежно-ледового покрова и ощущается сильный запах сероводорода. О периодических интенсивных выбросах на дневную поверхность газовых «струй» свидетельствует выявленный пик концентрации водорода в воздухе (*рис. 6*) по данным водородной съемки по субмеридиональному профилю № 4-4’ [1]. Профиль пересекает: боковую морену ледника Малый Азау; дацитовый лавовый поток в восточной части тепловой аномалии № 2; зону (мощностью 45 м) субширотного разлома и проходит в 150 м восточнее станции канатной дороги «Мир». Пик

концентрации водорода совпадает с местом выхода «столба» яркого белого свечения (*рис. 2*), располагавшегося над зоной современного субширотного разлома, представленного зоной повышенной трещиноватости пород. Вполне естественно, что в этой магматической камере (под аномалиией № 2) с газонасыщенным расплавом было большое давление флюида, вероятно, превышающее литостатическое. Поэтому по зоне повышенной проницаемости (микротрещиноватости в зоне разлома) произошла быстрая и интенсивная разгрузка избыточного давления флюида из-за быстрого выброса газов. Вероятно, в результате этого произошло образование аэрозольного «столба» высотой до 150 м, а находящиеся в нем микронные частицы вещества, при взаимодействии с ультрафиолетовым излучением, вызвали яркое белое свечение.

В.А. Алексеевым с соавторами [1] была проведена лидарная съемка на Эльбрусе с целью регистрирования обратного рассеяния аэрозольных фумарольных «облаков» (шлейфов) на участке между станцией Гарабаши (3 700 м) и верхней частью склона восточной вершины Эльбруса в районе мелкого паразитического кратера – «бокки» и над зонами активных разломов (зон повышенной трещиноватости пород). Принцип действия лидара заключается в измерении сигнала, образованного компонентой аэрозольного рассеяния излучения зондирующего импульса лазера в обратном направлении. Зондирование атмосферы проводилось ночью портативным аэрозольным лидаром обратного рассеяния в автономном режиме без участия оператора. Аэрозольные «облака» были установлены над активными фумаролами и разломами, причем максимальное по размерам «облако» (250 х 200 м) было установлено над боккой. Следовательно, еще одним методом установлен перенос газовой фазой из приповерхностных магматических камер с расплавом тонкодисперсных минералов и самородных металлов, что подтверждено анализом крупнообъемных проб снега (из поверхностного слоя толщи-

Рис. 5. **«Столб» яркого белого свечения, появившийся в мае 2012 г. ниже первой опоры новой канатной дороги над Поляной Азау, в основании вулканической постройки Эльбруса над зоной разлома с повышенной трещиноватостью (мощностью 53 м)**

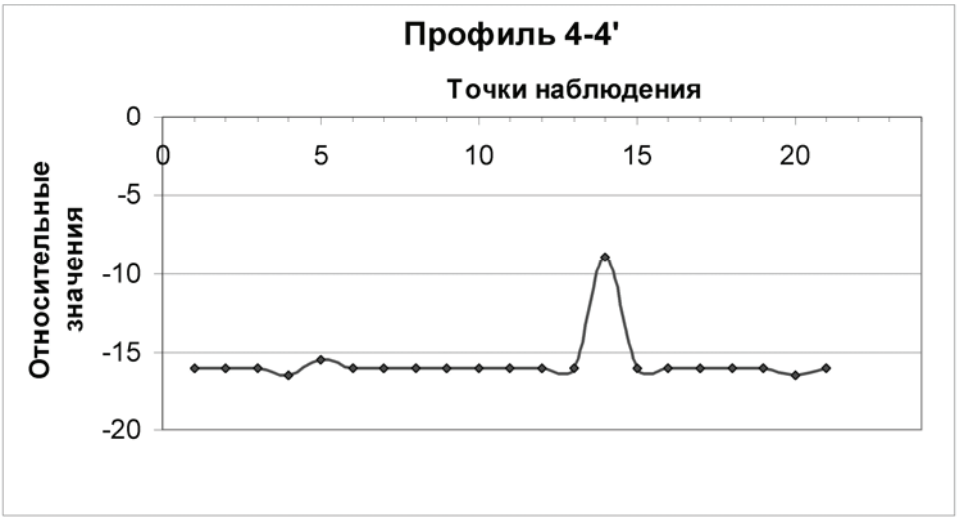

Рис. 6. **Профиль со значениями концентраций водорода [1] от станции «Мир» в сторону ледника Малый Азау. Пик в месте появления «столба» свечения (рис. 2)**

Таблица 3

Результаты геохимического анализа проб снега (содержания в мкг/л) [8, 9]

Элемент	Предел обнар. мкг/л	1/07	2/07	2-1/07	3/07	3-1/07	4/07	4-1/07	5/07	5-1/07
B	3.0	38.4	68.3	37.5	9.5	-	-	-	70.2	41.0
F	?	25349	35027	24939	3809	1498	5220	2760	12848	7320
S	?	3031	4465	3362	1004	878	2721	620	1860	450
Cl	?	29878	38956	11464	7620	5058	1084	710	9617	1059
Ca	300	2469	10865	863	2718	1511	701	373	4750	1170
Sc	0.1	4.4	6.7	3.7	1.4	0.6	1.3	0.6	2.6	1.0
V	?	6.6	12.9	4.4	3.0	1.0	0.9	0.4	3.2	2.3
Cr	0.5	4.8	6.8	2.9	1.5	-	1.4	0.8	2.8	1.2
Cu	3	7.7	50.1	4.9	-	-	-	-	281.0	84.0
Zn	5	73.3	137.1	41.0	24.6	14.4	90.6	-	6.6	-
As	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Se	5	12.1	17.3	10.1	6.2	-	7.5	-	2.2	-
Sr	0.5	5.5	33.1	1.3	5.5	2.8	1.9	1.0	6.6	3.5
Mo	0.05	0.3	1.1	0.1	6.8	3.0	0.4	-	0.3	-
Ag	0.05	0.2	0.2	-	-	-	-	сл.	-	-
Sn	0.1	0.7	2.0	0.3	-	-	-	-	0.2	-
I	0.1	8.4	15.8	5.8	3.3	1.5	2.9	0.9	6.7	3.4
Ba	0.1	22.0	35.6	16.1	1.4	-	3.0	0.6	2.1	1.0
W	0.05	0.2	0.9	0.07	12.6	4.0.	1.1	-	0.4	0.1
Pt	0.05	0.07	0.12	-	Сл.	-	-	-	-	-
Hg	0.2	0.6	12.2	0.5	8.9	0.7	0.4	-	0.7	0.3
Pb	0.3	1.5	5.1	0.7	-	-	1.0	-	0.6	-
Th	0.01	0.03	0.05	-	0.02	-	сл.	-	сл.	-
U	0.01	0.02	0.1	0.05	0.14	0.06	0.02	-	0.06	-

Примечание. *Содержания микроэлементов приведены в мкг/л. Знак "-" соответствует содержанию ниже предела обнаружения. Фоновые пробы отбирались с наветренной стороны по отношению к основным пробам. Места отбора проб снега: 1/07 – над маленькой интенсивной тепловой аномалией № 4, выявленной в районе станции канатной дороги «Мир»; 2/07 – в месте «столба» свечения, расположенного между станциями канатной дороги «Мир» и «Кругозор»; 2-1/07 – фоновая проба, расположенная в 300 и 400 м западнее мест отбора проб 1 и 2/07; 3/07 – новый «столб» свечения, расположенный напротив станции «Мир»; 3-1/07 – фоновая проба, отобранная в 300 м восточнее пробы 3/07; 4/07 – новая фумарола, появившаяся в марте 2007 г. в 250 м ниже по склону от станции «Кругозор»; 4-1/07 – фоновая проба, отобрана в 300 м восточнее; 5/07 – зона повышенной трещиноватости над юго-восточным краем тепловой аномалии № 1 (район ледника Гарабаши) в 700 м выше по склону от станции «Мир»; 5-1/07 – фоновая проба, отобрана в 400 м к востоку от тепловой аномалии № 1*

ной 1.0 м): в контурах тепловых аномалий; в местах проявления «столбов» яркого белого свечения; в пределах полей фумарольной активности; и над зонами повышенной трещиноватости в современных активных разломах.

Опыт изучения состава вещества аэрозольных «облаков», появляющихся над зонами активных разломов [1, 2] и на действующих вулканах, показал, что вещество оседает и лучше всего накапливается в снежном покрове, лежащем в непосредственной близости от мест дегазации. Исходя из этого, для изучения геохимических особенностей различных типов дегазации из пройденных в снегу шурфов (глубиной до 1 м) отбирались (по возможности) пробы из одних и тех же «суточных» горизонтов. Пробы располагались (*рис. 1*): над магматическими камерами (внутри контуров положительных тепловых аномалий); над зонами повышенной проницаемости (активные разломы); в местах появления «столбов» яркого белого свечения. Для оценки масштабов выноса ряда элементов, при различных видах дегазации, в шурфах отбирались фоновые

Таблица 4

Список выявленных минеральных фаз в сухих остатках выпаренных проб снега

Минеральная фаза	Проба	Примечание
Галит NaCl	50/07; 50-1/07;50-2/07; 51/07; 52/07; 53/07; 54/07; 55/07	Мелкообломочный, корки, переотложенные дендриты, колломорфные агрегаты в широком диапазоне размеров, в тесном срастании с сильвином. Ассоциирует со всеми другими минералами.
Сильвин KCl	50/07; 50-1/07; 50-2/07; 51/07 52/07; 53/07; 54/07; 55/07	Мелкообломочный, корки, переотложенные дендриты, колломорфные агрегаты в широком диапазоне размеров, в тесном срастании с галитом. Ассоциирует со всеми другими минералами.
Опал	50/07; 50-1/07; 50-2/07 51/07; 52/07;53/07; 54/07; 55/07	Включения, обломки, сферы и их агрегаты, широкий диапазон размеров в ассоциации с галитом и сильвином. Ассоциирует со всеми другими минералами.
Барит $Ba[SO_4]$	50/07; 50-1/07; 50-2/07; 51/07 52/07; 53/07; 54/07; 55/07	Сферические и кубические частицы и их агрегаты от 0.2 до 100 мкм. Ассоциирует со всеми другими минералами
Синджарит $CaCl_2$	50/07; 50-1/07;50-2/07;51/07; 52/07; 53/07; 54/07; 55/07	Агрегаты частиц с признаками переотложения размером до 5 мкм.
Pt самородная	50/07; 51/07	Частицы размером от 0.5 до 0.8 мкм. Всего найдено 5 частиц. Ассоциируют с хлоридами.
Циркон $Zr[SiO_4]$	50/07	Ассоциирует с хлоридами. Неправильной формы зерна размером 1-3 мкм.
(IMA2002-034) $CdSO_4 4H_2O$	50/07	Многочисленные частички размером до 0.5 мкм в виде включений в хлоридах.
Минеральная фаза группы каолинита (Al:Si1:1)	52/07	Неправильной формы частицы менее 1 мкм. В малых количествах присутствует и в других пробах.
Полевые шпаты разного состава	51/07; 54/07	Частицы размером 5-20 мкм обломочной формы.
Хлормайенит $Ca_{12}Al_{14}[SiO_4]O_{33}Cl_2$	51/07; 54/07	Обломки неправильной формы до 10 мкм.
Акаганеит FeO(OH,Cl)	50/07; 51/07;55/07	Агрегаты неправильной формы размером до 200 мкм.
Халькопирит $FeCuS_2$	53/07	Частые включения в хлоридах размером до 5 мкм.
Гипс $CaSO_4 2H_2O$	50-1/07; 53/07;54/07; 55/07	Частицы удлиненной формы размером до 5-7 мкм, часто образуют сростки.
FeO	50/07; 51/07 55/07	Агрегаты размером менее 4 мкм. Сфероиды размером около 1 мкм.
$FeSO_4$;$CuSO_4$	50-1/07; 51/07	Агрегаты тонкодисперсных частиц с признаками переотложения.
Сванбергит $SrAl_3[SO_4][PO_4](OH)_6$	54/07	Плоская частичка размером около 10 мкм.
Cl-органика	53/07	Сложно обнаруживаемая, возможно присутствует в других пробах.

Примечание. *Факт необнаружения минеральной фазы в какой-либо пробе не может служить доказательством ее отсутствия.*

пробы из тех же горизонтов, что и основные пробы снега. Эти шурфы располагались на удалении 300–400 м с наветренной стороны от основных проб для исключения заноса сюда ветром вещества из аэрозольных «облаков». В *таблице 3* приведены результаты анализов всех проб снега, выполненных в ИГЕМ РАН аналитиком С.А. Горбачевой методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) на приборе Plasma Quard PQ-2 фирмы VG Turbo Instrument (Великобритания). В пробах определялось содержание микроэлементов, а затем бралось отношение содержаний одних и тех же элементов в основных пробах снега к тем же элементам в фоновых пробах. В результате было доказано существование транспортировки газами ряда тонкодисперсных минералов и самородных металлов при дегазации расплава из приповерхностных магматических камер, через зоны повышенной проницаемости и микротрещины в породах кровель камер, и оценен ее масштаб [8, 9]. Для изучения минеральных форм выносящегося газами вещества в местах отбора основных геохимических проб были взяты крупные пробы снега. После его таяния получилось до 1 литра воды в каждой пробе. Пробы отбирались в следующих местах: № 50/07 – маленькая тепловая аномалия № 4 в районе станции «Мир» канатной дороги; № 50-1/07 – северо-восточный край тепловой аномалии № 2, ниже станции «Мир»; № 50-2/07 (фоновая проба) – в 300 м восточнее маленькой тепловой аномалии № 4 в районе станции «Мир»; № 51/07 – в районе новой фумаролы у станции «Кругозор»; № 52/07 – юго-восточный край тепловой аномалии № 1, в правом борту ледника Гарабаши; № 53/07 – в месте появления «столба» яркого белого свечения, напротив станции «Мир», над зоной современного активного разлома (резко повышенная проницаемость для флюидов); № 54/07 – нижний, южный край тепловой аномалии № 1, в 400 м южнее станции «Бочки» кресельной дороги на Эльбрус; № 55/07 – восточный край аномалии № 1 в районе ледника Гарабаши.

Эти пробы выпаривались при температуре 50 °С до получения сухого остатка, который изучался на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610LV (Япония), оснащенном энергодисперсионным спектрометром INCA-450 (Великобритания). Препараты готовились в виде спиртовых суспензий, нанесенных на двойной углеродный скотч, прикрепленный к алюминиевым электронно-микроскопическим столикам. Спирт использовался вместо воды, чтобы избежать переотложения легко растворимых в воде фаз. Количественный элементный анализ выполнялся в режиме нормировки к 100 %, так как препарат не мог быть отполирован. При расчете содержаний элементов для сростков и ассоциированных минеральных фаз учитывался состав матрицы и окружающих частиц. Результаты изучения представлены в *таблице 4* [8, 9].

В основном все пробы представлены хлоридами – галитом и сильвином, а также тесно ассоциированными с ними оксидом кремния, опалом и баритом. Последний представлен субмикронными сферическими частицами и более крупными, четко очерченными кубической формы кристаллами и их агрегатами. Морфология и ассоциация с хлоридами указывает на их синтез из газовой фазы и галогеновый характер их транспортировки. На это же указывают и другие диагностированные фазы: синджарит, хлормайенит, акаганеит, самородная платина, Cl-содержащая органика. Во влажной газовой среде, насыщенной сернистыми соединениями, могли образоваться сульфаты железа и меди, гипс и сванбергит. Частицы каолинитовых фаз и полевых шпатов, скорее всего, были захвачены газовым потоком на пути к земной поверхности и интегрированы с другими минеральными фазами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Петрофизические свойства вулканических пород (*табл. 1)*, слагающих вулканическую постройку Эльбруса, свидетельствуют о том, что дегазация расплава, находящегося в приповерхностных магматических камерах, сопровождается транспортировкой газовой фазой микронного размера частиц самородных металлов и минералов (в том числе и рудных); дегазация вполне может осуществляться за счет повышенной проницаемости дацитовых лав, а также через микротрещины в перекрывающих приповерхностные камеры породах. Реальность этих процессов подтверждена периодически появляющимися над положительными тепловыми аномалиями аэрозольными «облаками», потоками водорода, зафиксированными в ночное время геолидаром [1, 2], и «столбами» яркого белого свечения (*рис. 2-3*). Положительные тепловые аномалии на вулканической постройке Эльбруса были обусловлены расположенными под ними на глубине 2–4 км приповерхностными камерами с расплавом.

2. Впервые для вулкана Эльбрус при электронно-микроскопических исследованиях установлены субмикронные сферические частицы и более крупные кубической формы кристаллы барита и опала и их агрегаты, морфология и ассоциация которых с хлоридами указывает на их синтез из газовой фазы и галогеновый характер их транспортировки к земной поверхности. На это же указывают и другие диагностированные минеральные фазы: синджарит, хлормайенит, акаганеит, самородная платина, Cl-содержащая органика. В.И. Рехарским с соавторами [20, 21] доказана возможность транспортировки газовой фазой минеральных фаз микронной размерности посредством галогенов и их последующего отложения как в порах, кавернах пород, так и в межзерновом пространстве или в приоткрывающихся микротрещинках в породе.

3. Появление аэрозольных «столбов» с ярким белым свечением в солнечную погоду можно рассматривать как один из надежных индикаторов

поступления новой порции флюида из газонасыщенного расплава приповерхностной магматической камеры, находящейся под ними на небольшой (2-4 км) глубине, и в связи с сильным повышением внутрикамерного флюидного давления. Камеры соединяются с дневной поверхностью благодаря повышенной проницаемости дацитовых лавовых потоков и/или «зияющей» микротрещиноватости в зонах активных разломов. Этот признак особенно важен при оценках современного состояния «спящих» вулканов и возможности их активизации в будущем.

4. Результаты проведенных комплексных исследований пород, слагающих ЭВЦ, убедительно доказали наличие в его пределах пневматолитового типа рудной минерализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.А., Алексеева Н.Г., Дканиялов М.Г. и др. Научно-технический отчет по результатам комплексной экспедиции на Эльбрус, июнь 2007. «Изучение фумарольной активности вулкана Эльбрус, исследование состава тектонических аэрозолей и фирна». – Москва: ИЗМИРАН, 2007. 33 с.

2. Алексеев В.А., Алексеева Н.Г., Бобков А.В, Дканиялов М.Г. Изучение вулканических аэрозолей на вулканах Авачинский, Корякский, Эльбрус. Связь потока аэрозолей с деформациями поверхности // Магматизм и рудообразование / Матер. конф., посвященной 125-летию со дня рождения акад. А.Н. Заварицкого. 18–19 марта 2009 г. – М.: ИГЕМ РАН. 2009. С. 10–12.

3. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Грознова Е.О. и др. Гейзериты Эльбрусского вулканического центра // Вестник ВНЦ РАН. 2024. Том 24. № 1. С. 67–74 .

4. Гамянин 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.

5. Геологический словарь. (Гл. редактор акад. АН Арм. ССР Паффенгольц К.Н. Ред. коллегия: Алихова Т.Н., Берлин Т.С., Боровиков Л.И., и др.). Т. 2. – Москва: Недра, 1973. С. 102.

6. Греков И.И., Арбузкин В.Н., Литовко Г.В., Трофименко Е.А. Тектонодинамика Эльбрус-Кюгенского вулканического района (Центральный Кавказ) // Современные методы геолого-геофизического мониторинга природных процессов на территории Кабардино-Балкарии. – М.: ИФЗ РАН, КБГУ. 2005. С. 83–93.

7. Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Докучаев А.Я. и др. Проявление рудоносных гидротермально-метасоматических процессов в районе Эльбрусского вулканического центра (Северный Кавказ, Россия) // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 3. С. 225–245.

8. Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С. и др. Приповерхностные магматические камеры «спящего» вулкана Эльбрус (Россия): новый тип дегазации расплава, ее геохимические особенности и рудная минерализация // Вестник ВНЦ РАН. 2009. Том 9. № 2. С. 24–36.

9. Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С. и др. Необычные виды дегазации из расплавов периферических магматических камер «спящего» вулкана Эльбрус (Россия): геохимические и минералогические особенности // Вулканология и сейсмология. 2011. № 4. С. 3–20.

10. Гурбанов А.Г. Газеев В.М., Докучаев А.Я. и др. Рудно-магматические системы Эльбрусского вулканического центра // Вестник ВНЦ РАН. 2024. Том 24. № 2. С. 66–80.

11. Корниенко С.Г., Ляшенко О.В., Гурбанов А.Г. и др. Проблемы мониторинга периферических магматических камер под Эльбрусским вулканическим центром по данным тепловой космической съемки // Современные методы геолого-геофизического мониторинга природных процессов на территории Кабардино-Балкарии. – М.: ИФЗ РАН. КБГУ. 2005. С. 266–276.

12. Мальковский В.И., Жариков А.В., Шмонов В.М. Новые методы измерения проницаемости образцов горных пород для однофазного флюида // Физика Земли. 2009. № 2. С. 3–14.

13. Милюков В.К. Мониторинг состояния магматических структур вулкана Эльбрус по наблюдениям литосферных деформаций // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 1–13.

14. Науменко В.В. Вулканизм и вулканогенное оруденение. – Киев: Препринт ИГФМ. 1987. 65 с.

15. Наумов В.Б., Толстых М.Л., Гурбанов А.Г. и др. Условия образования ксенолитов из плейстоценовых лавовых потоков вулкана Эльбрус (Кавказ) // Геохимия. 2001. № 11. С. 1230–1236.

16. Новейший и современный вулканизм на территории России (ред. академик Н.П. Лаверов). – М.: Наука, 2005. 604 с.

17. Природные процессы на территории Кабардино-Балкарии (под редакцией Н.П. Лаверова). – М.: ИГЕМ РАН, 2004. 438 с.

18.Пэк А.А. О динамике ювенильных растворов. – М.: Наука, 1968. 147 с.

19. Пэк А.А., Мальковский В.И. Динамика рудоотложения на подвижном температурном барьере при формировании золоторудных месторождений в архейских зеленокаменных поясах // Новые направления в изучении колчеданных месторождений. – Новочеркасск: Новочеркасский гос. техн. ун-т, 1997. С. 150–162.

20. Рехарский В.И., Гурбанов А.Г., Диков Ю.П. и др. О формах нахождения вольфрама в позднепалеозойских гранитах (Кавказ) // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1987. № 7. С.127–129.

21. Рехарский В.И., Гурбанов А.Г., Диков Ю.П. и др. Генетические особенности некоторых необычных типов вольфрамового оруденения // Геология рудных месторождений. 1993. Т. 35. № 2. С.132–141.

22. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник / Зубарев В.Н., Козлов А.Д., Кузнецов В.М. и др. – М.: Энергоатомиздат. 1989. 232 с.

23. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Гурбанов А.Г. и др. Состав магматических расплавов вулкана Эльбрус и Казбек (Кавказ) по данным изучения включений в минералах // Геохимия. 2001. № 4. С. 441–448.

24. Шмонов В.М., Витовтова В.М., Жариков А.В. Флюидная проницаемость пород земной коры. – М.: Научный мир, 2002. 216 с.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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. Alekseev V.A., Alekseeva N.G., Dkaniyalov M.G. i dr. Nauchno-tekhnicheskij otchet po rezul'tatam kompleksnoj ekspedicii na El'brus, iyun' 2007. «Izuchenie fumarol'noj aktivnosti vulkana El'brus, issledovanie sostava tektonicheskih aerozolej i firna». – Moskva: IZMIRAN, 2007. 33 s.

2. Alekseev V.A., Alekseeva N.G., Bobkov A.V, Dkaniyalov M.G. Izuchenie vulkanicheskih aerozolej na vulkanah Avachinskij, Koryakskij, El'brus. Svyaz' potoka aerozolej s deformaciyami poverhnosti // Magmatizm i rudoobrazovanie / Mater. konf., posvyashchennoj 125-letiyu so dnya rozhdeniya akad. A.N. Zavarickogo. 18–19 marta 2009 g. – M.: IGEM RAN. 2009. S. 10–12.

3. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Groznova E.O. i dr. Gejzerity El'brusskogo vulkanicheskogo centra // Vestnik VNC RAN. 2024. Tom 24. № 1. S. 67–74 .

4. Gamyanin G.N., ZHdanov YU.YA., Syromyatnikova A.S. Sostav i strukturnye osobennosti sferoidov iz zolotorudnyh mestorozhdenij Vostochnoj YAkutii // Zapiski VMO. 1999. № 5. S. 71–76.

5. Geologicheskij slovar'. (Gl. redaktor akad. AN Arm. SSR Paffengol'c K.N. Red. kollegiya: Alihova T.N., Berlin T.S., Borovikov L.I., i dr.). T. 2. – Moskva: Nedra, 1973. S. 102.

6. Grekov I.I., Arbuzkin V.N., Litovko G.V., Trofimenko E.A. Tektonodinamika El'brus-Kyugenskogo vulkanicheskogo rajona (Central'nyj Kavkaz) // Sovremennye metody geologo-geofizicheskogo monitoringa prirodnyh processov na territorii Kabardino-Balkarii. – M.: IFZ RAN, KBGU. 2005. S. 83–93.

7. Gurbanov A.G., Bogatikov O.A., Dokuchaev A.YA. i dr. Proyavlenie rudonosnyh gidrotermal'no-metasomaticheskih processov v rajone El'brusskogo vulkanicheskogo centra (Severnyj Kavkaz, Rossiya) // Geologiya rudnyh mestorozhdenij. 2008. T. 50. № 3. S. 225–245.

8. Gurbanov A.G., Bogatikov O.A., Karamurzov B.S. i dr. Pripoverhnostnye magmaticheskie kamery «spyashchego» vulkana El'brus (Rossiya): novyj tip degazacii rasplava, ee geohimicheskie osobennosti i rudnaya mineralizaciya // Vestnik VNC RAN. 2009. Tom 9. № 2. S. 24–36.

9. Gurbanov A.G., Bogatikov O.A., Karamurzov B.S. i dr. Neobychnye vidy degazacii iz rasplavov periphericheskih magmaticheskih kamer «spyashchego» vulkana El'brus (Rossiya): geohimicheskie i mineralogicheskie osobennosti // Vulkanologiya i sejsmologiya. 2011. № 4. S. 3–20.

10. Gurbanov A.G. Gazeev V.M., Dokuchaev A.YA. i dr. Rudno-magmaticheskie sistemy El'brusskogo vulkanicheskogo centra // Vestnik VNC RAN. 2024. Tom 24. № 2. S. 66–80.

11. Kornienko S.G., Lyashenko O.V., Gurbanov A.G. i dr. Problemy monitoringa periphericheskih magmaticheskih kamer pod El'brusskim vulkanicheskim centrom po dannym teplovoj kosmicheskoj s"emki // Sovremennye metody geologo-geofizicheskogo monitoringa prirodnyh processov na territorii Kabardino-Balkarii. – M.: IFZ RAN. KBGU. 2005. S. 266–276.

12. Mal'kovskij V.I., ZHarikov A.V., SHmonov V.M. Novye metody izmereniya pronicaemosti obrazcov gornyh porod dlya odnofaznogo flyuida // Fizika Zemli. 2009. № 2. S. 3–14.

13. Milyukov V.K. Monitoring sostoyaniya magmaticheskih struktur vulkana El'brus po nablyudeniyam litosfernyh deformacij // Vulkanologiya i sejsmologiya. 2006. № 1. S. 1–13.

14. Naumenko V.V. Vulkanizm i vulkanogennoe orudenenie. – Kiev: Preprint IGFM. 1987. 65 s.

15. Naumov V.B., Tolstyh M.L., Gurbanov A.G. i dr. Usloviya obrazovaniya ksenolitov iz plejstocenovyh lavovyh potokov vulkana El'brus (Kavkaz) // Geohimiya. 2001. № 11. S. 1230–1236.

16. Novejshij i sovremennyj vulkanizm na territorii Rossii (red. akademik N.P. Laverov). – M.: Nauka, 2005. 604 s.

17. Prirodnye processy na territorii Kabardino-Balkarii (pod redakciej N.P. Laverova). – M.: IGEM RAN, 2004. 438 s.

18.Pek A.A. O dinamike yuvenil'nyh rastvorov. – M.: Nauka, 1968. 147 s.

19. Pek A.A., Mal'kovskij V.I. Dinamika rudootlozheniya na podvizhnom temperaturnom bar'ere pri formirovanii zolotorudnyh mestorozhdenij v arhejskih zelenokamennyh poyasah // Novye napravleniya v izuchenii kolchedannyh mestorozhdenij. – Novocherkassk: Novocherkasskij gos. tekhn. un-t, 1997. S. 150–162.

20. Rekharskij V.I., Gurbanov A.G., Dikov YU.P. i dr. O formah nahozhdeniya vol'frama v pozdnepaleozojskih granitah (Kavkaz) // Izv. AN SSSR. Ser. geol. 1987. № 7. S.127–129.

21. Rekharskij V.I., Gurbanov A.G., Dikov YU.P. i dr. Geneticheskie osobennosti nekotoryh neobychnyh tipov vol'framovogo orudeneniya // Geologiya rudnyh mestorozhdenij. 1993. T. 35. № 2. S.132–141.

22. Teplofizicheskie svojstva tekhnicheski vazhnyh gazov pri vysokih temperaturah i davleniyah: Spravochnik / Zubarev V.N., Kozlov A.D., Kuznecov V.M. i dr. – M.: Energoatomizdat. 1989. 232 s.

23. Tolstyh M.L., Naumov V.B., Gurbanov A.G. i dr. Sostav magmaticheskih rasplavov vulkana El'brus i Kazbek (Kavkaz) po dannym izucheniya vklyuchenij v mineralah // Geohimiya. 2001. № 4. S. 441–448.

24. SHmonov V.M., Vitovtova V.M., ZHarikov A.V. Flyuidnaya pronicaemost' porod zemnoj kory. – M.: Nauchnyj mir, 2002. 216 s.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. Vila T., Sillitoe R.H. Gold-rich porphyry systems in the Maricunga Belt, Northern Chile // Economic Geology. 1991. V. 86. P. 1238–1260.