

УДК 553.067:550.84.09

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВУЛКАНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ЭКСГАЛЯЦИОННОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В КРАТЕРНОЙ ЧАСТИ АКТИВНОГО ВУЛКАНА КУДРЯВЫЙ (ОСТРОВ ИТУРУП КУРИЛЬСКОЙ ГРЯДЫ)

© 2020 г. А. Г. Марченко^{a, *}, А. А. Вольфсон^{b, **}, М. В. Морозов^{a, d, ***},
Н. С. Хрол^{a, ***}, Г. С. Штейнберг^{c, ****}, М. Г. Штейнберг^{c, *****}

^aГруппа компаний “Теллур”, ООО “Теллур Северо-Восток”,
ул. Союза Печатников, 8, оф. 17, Санкт-Петербург, 190068 Россия

^bИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

^cООО “Институт вулканологии и геодинамики”, ул. Спиридоновка, д. 6, стр. 1, Москва, 123001 Россия

^dСанкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
Университетская наб., д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: a-marchenko@yandex.ru

**e-mail: sanches27@list.ru

***e-mail: tellur_spb@list.ru

****e-mail: gs-steinberg@yandex.ru

*****e-mail: glider12@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2018 г.

После доработки 12.07.2019 г.

Принята к публикации 12.08.2019 г.

В кратерной части активного вулкана Кудрявый протекает процесс формирования эксгальационной рудной минерализации. По результатам литогеохимического опробования установлено, что в твердых фумарольных образованиях накапливаются Re, Au, Ag, As, Bi, Cd, Cu, Ge, In, Mo, Pb, S, Sb, Se, Sn, Te, Tl, W, Zn, Rb, Cs, которые привносятся высокотемпературными вулканическими газами и отлагаются в минеральных фазах в приповерхностных горизонтах фумарольных полей в условиях падения температуры. Содержания рения и других металлов в вулканогенных отложениях фумарольных полей местами достигают значений, свойственных рудным месторождениям. Выявлено зональное размещение литогеохимических аномалий ассоциаций рудных элементов, которое выражается рядом Re, Mo, W, Au, Cu, Ag, Zn, Cs, Ge → In → Bi, Cd, Pb, Sn, Tl → As, Sb, Se, Te, (Cu, Ag, Au) в направлении от наиболее высокотемпературных фумарольных полей к менее горячим, отражая их температурную зональность. Показано, что латеральная геохимическая зональность обусловлена как содержаниями рудных элементов в фумарольных газах, которые зависят от температуры, так и различиями оптимальных температурных интервалов отложения разных элементов из газов. Выявлены признаки того, что подобные процессы эксгальационного минералообразования происходили в недавнем геологическом прошлом на соседнем потухшем вулкане Средний. Это позволяет предположить протекание подобных процессов в пределах других вулканических систем острова Итуруп, что повышает их перспективы на обнаружение комплексных проявлений редких, цветных и благородных металлов эксгальационного генезиса.

Ключевые слова: фумарольные газы, вулканогенные отложения, температурная съемка, литогеохимическое опробование, геохимическая зональность, рений, редкие, цветные и благородные металлы, современная эксгальационная минерализация, вулкан Кудрявый, остров Итуруп

DOI: 10.31857/S0016777020020033

ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Кудрявый, расположенный в северо-восточной части острова Итуруп Большой Курильской гряды, привлекает особое внимание исследователей уже два с половиной десятилетия в связи с

обнаружением в его фумарольных газах и твердых продуктах фумарольной деятельности высоких концентраций рения, индия, других редких, цветных и благородных металлов. В составе рудных образований фумарол был обнаружен ряд

сульфидов редких элементов, часть из которых открыта именно на Кудрявом: рениит ReS_2 , утвержденный как новый минеральный вид в 2005 г., кудрявит $(\text{Cd,Pb})\text{Bi}_2\text{S}_4$, кадмоиндит CdIn_2S_4 , абрамовит $\text{Pb}_2\text{BiSnInS}_7$, знаменскийит $\text{Pb}_4\text{Bi}_4\text{In}_2\text{S}_{13}$. Было установлено, что образование рениита и других рудных минералов в кратерной части вулкана происходит из высокотемпературных вулканических газов (Ткаченко и др., 1992, 1999; Знаменский и др., 1993, 2005; Коржинский и др., 1993; Korzhinsky et al., 1994; Добровольская и др., 1996; Yudovskaya et al., 2008; Чаплыгин, 2009, 2016). По мнению некоторых исследователей (Шагерман, Кременецкий, 1996; Шагерман и др., 1996; Кременецкий, Чаплыгин, 2010), фумарольные газы, в которых присутствуют значительные содержания рения и сопутствующих элементов, в перспективе могут оказаться новым, нетрадиционным источником минерального сырья. Вулкан Кудрявый как уникальная природная рудопроизводящая фабрика, в которой в настоящее время протекают процессы дегазации магмы и происходит взаимодействие в системе газ–порода–воздух с формированием рудной минерализации в твердых фумарольных образованиях, представляет исключительный интерес как для исследований в области геохимии вулканических процессов и эксталяционного рудообразования, так и для изучения процессов формирования и эволюции порфирово–эпитермальных систем.

Предлагаемая вниманию читателей статья основывается, главным образом, на новых данных по температурам и элементному составу фумарольных отложений, которые были получены в результате работ 2015 года, когда на вулкане Кудрявый были выполнены тепловая (температурная) и литогеохимическая съемки кратерной части вулкана масштаба 1 : 2500, а также детализационная тепловая съемка Рениевого и Молибденового (Поле 605) фумарольных полей (фиг. 1). При подготовке статьи дополнительно привлекались данные предыдущих исследований по составу фумарольных газов и твердых фумарольных образований¹.

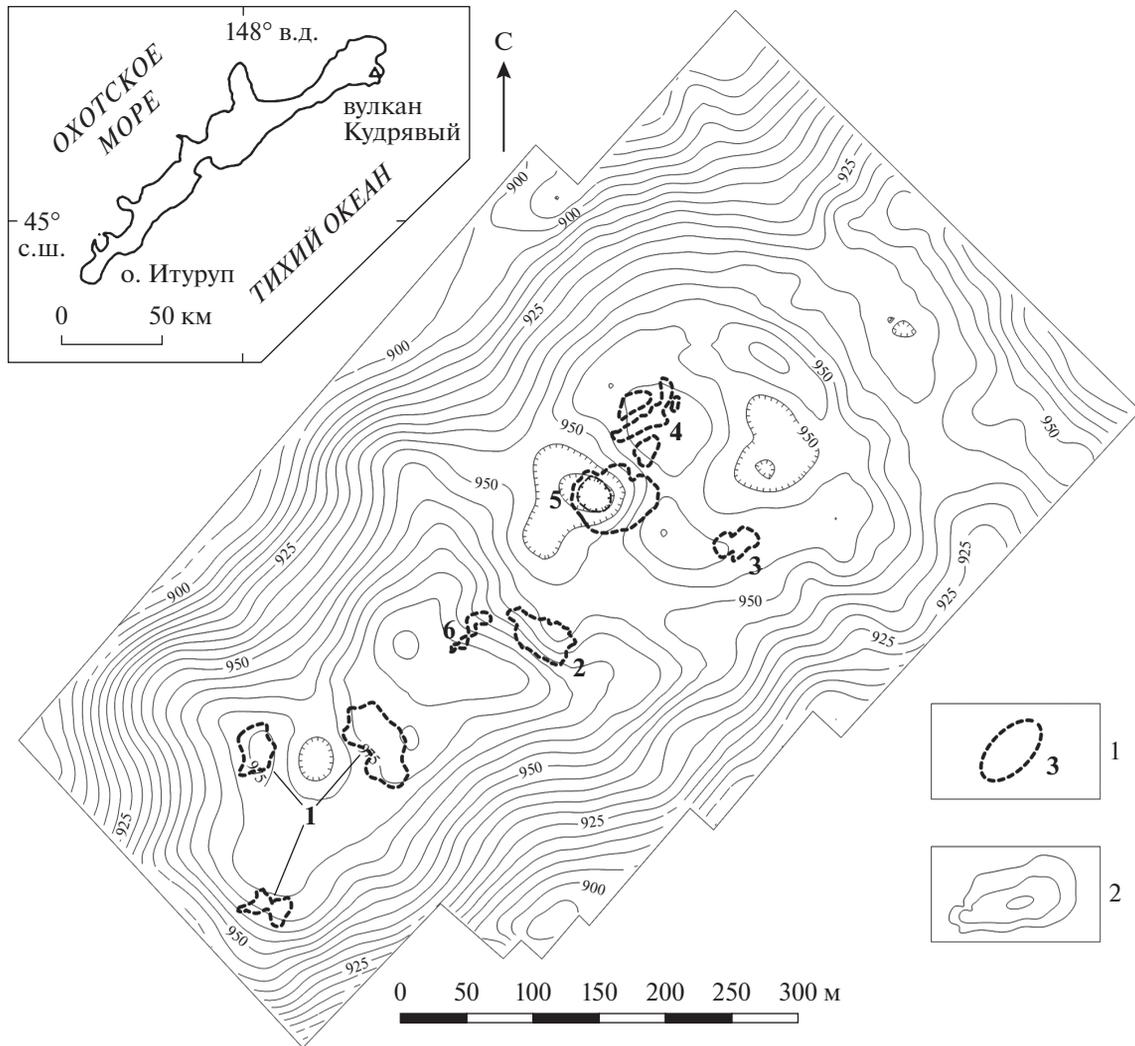
КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВУЛКАНА

Андезито–базальтовый стратовулкан Кудрявый находится в пределах кальдеры Медвежья и входит в состав вулканического хребта Медвежий, возникшего вдоль разлома северо–восточного простирания (Ермаков, Штейнберг, 1999). Хребет включает вулканы Медвежий (вершина

1125 м), Средний (1116 м), Кудрявый (986 м) и Меньший Брат (563 м). Действующим является только вулкан Кудрявый – самый молодой из них. Со времени последних магматических извержений вулкана Кудрявый, которые происходили в 1778–1779 и 1883 гг. (Горшков, 1967; Ермаков, Штейнберг, 1999), его активность характеризуется интенсивной фумарольной деятельностью. На фоне дегазации, имеющей квазистационарный характер, в кратерной зоне происходят фреатические извержения, последнее из которых было 7–11 октября 1999 г. (Коржинский и др., 2002) и при котором сформировалась округлая в плане воронка диаметром 45–50 м и глубиной около 50 м. Температура самой горячей фумаролы на вулкане Кудрявый достигала в 1992–1993 гг. 930–940°C – это самая высокая температура, когда-либо измеренная в стационарных парогазовых выходах вулканов (Коржинский и др., 1993; Taran et al., 1995). Кудрявый – это единственный в мире вулкан, где в фумарольных инкрустациях в макрокочевках обнаружен сульфид рения (Знаменский и др., 1993; Коржинский и др., 1993; Korzhinsky et al., 1994).

Вулкан Кудрявый сложен серией лавовых потоков андезито–базальтового комплекса позднего голоцена, которые наложены на экструзивный купол андезит–дацит–риолитового состава (Государственная геологическая карта..., 2002). В кратерной части вулкана, которая находится на высотах 900–986 м над уровнем моря, выделяется три позднеголоценовых кратера: с северо–востока на юго–запад кратеры Тукап, Рениевый и Южный, сформированные на магмоподводящем раздвиге северо–восточного простирания, к юго–западу от раннеголоценового вулкана Средний (фиг. 2). В первых двух кратерах расположены четыре высокотемпературных фумарольных поля с температурами газов, достигающими 300–940°C. На северо–востоке, в кратере Тукап, расположены поле Купол, которое состоит из нескольких сближенных фумарольных площадок, поле Главное, в пределах которого находится кратер последнего фреатического извержения, и Поле 605 (Молибденовое). Далее к юго–западу, в кратере Рениевый, находятся Рениевое и Ангидритовое фумарольные поля. На юго–западе, в Южном кратере, расположены низкотемпературные фумарольные поля с температурами газов 50–200°C (см. фиг. 1). Небольшое по размеру поле Ангидритовое, расположенное западнее Рениевого поля рядом с ним, имеет промежуточные между высоко– и низкотемпературными полями тепловые характеристики. По данным сейсмических исследований (Жигулев, Аргентов, 2000; Жигулев, 2010), под кратерами Тукап и Рениевый на глубинах 400–500 м от поверхности, внутри общей конической постройки вулкана Кудрявый, возвышающейся над днищем кальдеры Медвежья, можно предположить наличие периферийного магматиче-

¹ Кроме опубликованных материалов, использованы данные, полученные в результате поисково–оценочных работ коллектива Института вулканологии и геодинамики (ИВиГ) РАЕН 1993–2001 гг. под руководством Г.С. Штейнберга по оценке запасов рения на рудопроявлении вулкана Кудрявый (о. Итуруп), нашедшие отражение в отчете ИВиГ по гос. контракту № 17–98.



Фиг. 1. Рельеф и главные фумарольные поля кратерной части вулкана Кудрявый. 1 – фумарольные поля и их номера (1 – низкотемпературные поля кратера Южный, 2 – Рениевое, 3 – Поле 605 (Молибденовое), 4 – Купол, 5 – Главное, 6 – Ангидритовое); 2 – изогипсы рельефа.

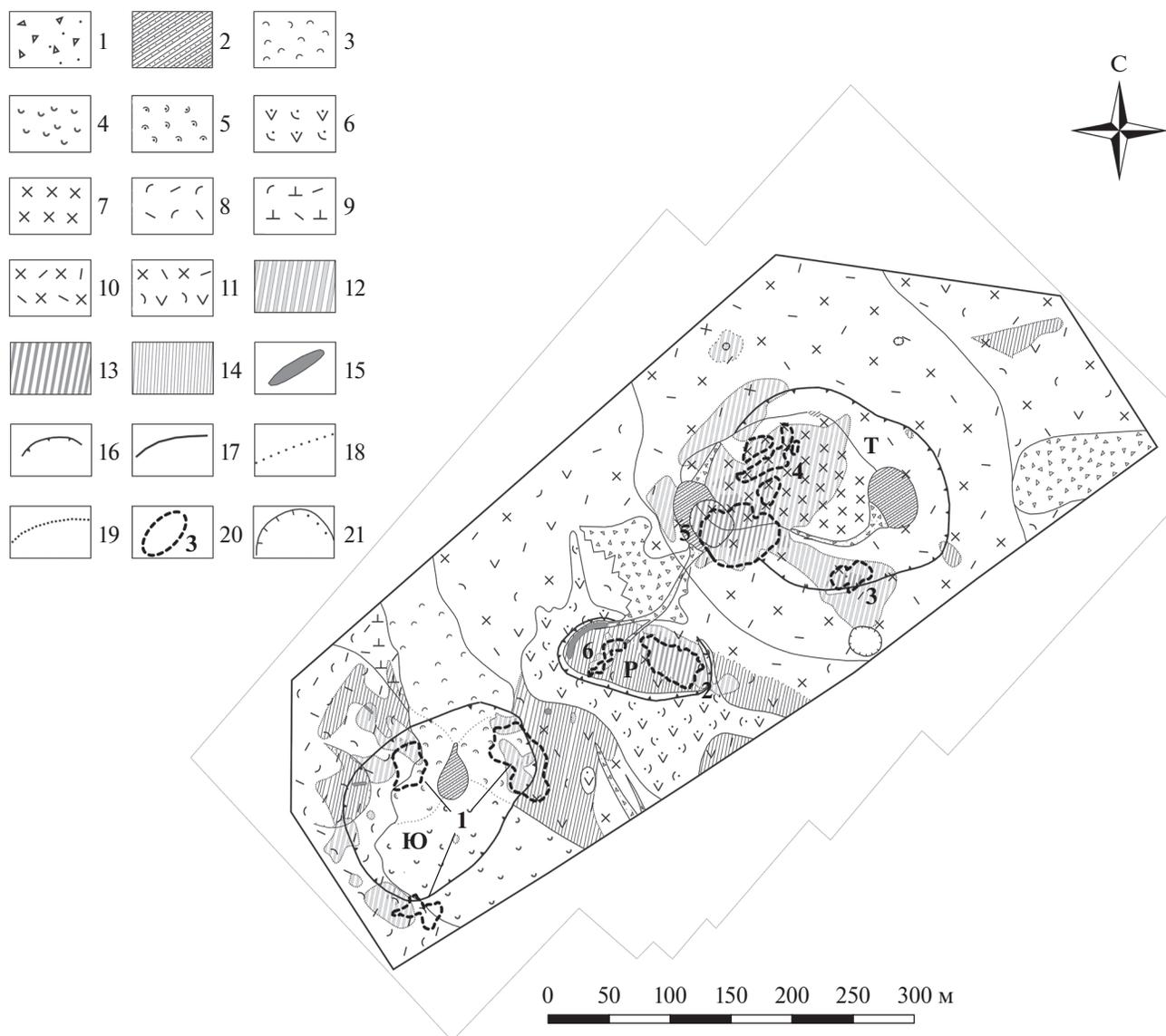
ского очага, обуславливающего современную активность вулкана. Кроме того, на глубине около 70 м по сейсмограммам интерпретируется наличие пористо-трещиноватого газонасыщенного тела изометричной формы диаметром 100–150 м.

ДАННЫЕ О ТЕМПЕРАТУРЕ И СОСТАВЕ ФУМАРОЛЬНЫХ ГАЗОВ

Температуры газов изученных фумарольных полей возрастают с юго-запада на северо-восток от низкотемпературных полей кратера Южный ($\approx 50\text{--}200^\circ\text{C}$) к высокотемпературным полям: Рениевому полю ($\approx 300\text{--}600^\circ\text{C}$) в одноименном кратере, полям 605 ($\approx 400\text{--}650^\circ\text{C}$), Купол ($\approx 500\text{--}850^\circ\text{C}$) и Главное ($\approx 600\text{--}940^\circ\text{C}$) в кратере Тукап. В составе газов, по данным из работ (Taran et al., 1995; Чаплыгин, 2009), резко преобладает вода ($\text{H}_2\text{O} \approx$

$\approx 92.1\text{--}98.5$ мол. %), характерными макрокомпонентами являются CO_2 , SO_2 , H_2S , HCl и H_2 , типичные содержания которых составляют от единиц до десятых долей мол. %, а содержания атмосферных газов – N_2 и O_2 – предельно малы (десятые–сотые доли мол. %). В количестве сотых–тысячных долей мол. % и менее присутствуют CO , HF , CH_4 и Ar .

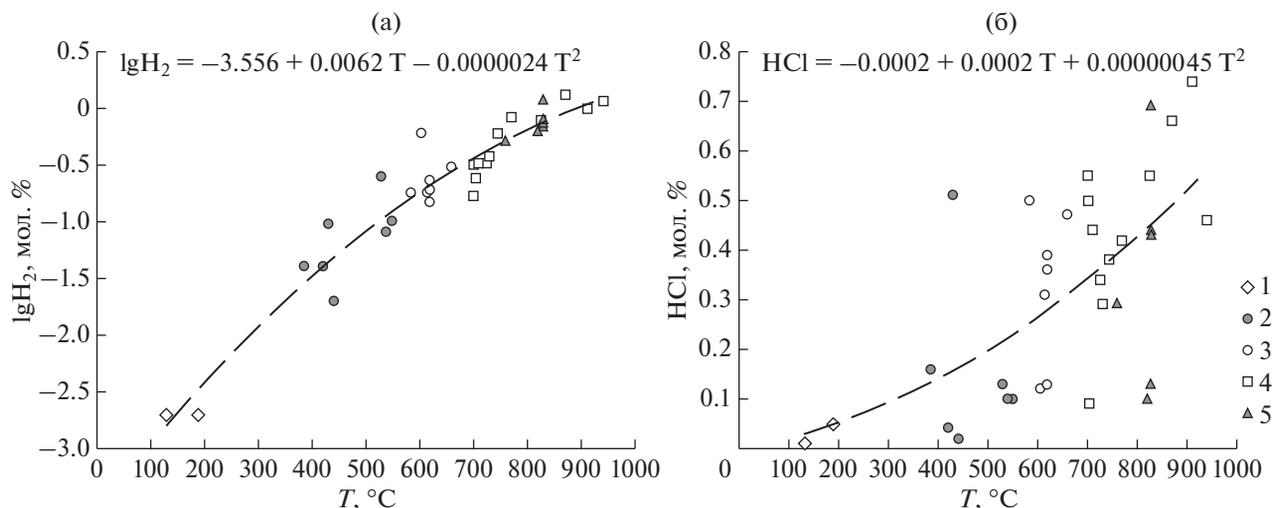
Рассмотрение данных по макросоставу фумарольных газов, взятых из работ (Taran et al., 1995; Чаплыгин, 2009), показывает, что распределения значений температуры газов и содержаний H_2O , CO_2 , SO_2 , H_2S , HCl лучше аппроксимируются нормальным законом, а H_2 , CO , HF , N_2 , O_2 , Ar , CH_4 – логарифмически-нормальным законом, поэтому вычисления коэффициентов корреляции с температурой для последней группы газов



Фиг. 2. Схема геологического строения кратерной части вулкана Кудрявый. По геологической карте, составленной В.А. Ермаковым, А.В. Соловьевым и Г.С. Штейнбергом (2001) с изменениями П.Ю. Ковтуновича (2016). 1 – лахаровые отложения; 2 – кратерно-озерные отложения; 3 – андезибазальты потока Черныш; 4 – андезибазальты потока Зевок; 5 – тефра андезибазальтов; 6 – тефра и туфы андезибазальтов; 7 – андезиты; 8 – лавы андезибазальтов; 9 – лавы базальтов и андезибазальтов; 10 – лавы андезитов; 11 – лавы и туфы андезибазальтов и андезитов; 12 – серные кварциты, опалиты; 13 – гидротермалиты фумарол; 14 – аргиллизиты, вторичные кварциты, алунитизированные и ангидритизированные породы; 15 – пластовые тела и жилы ангидрита; 16 – кратеры (Т – Тукап, Р – Рениевый, Ю – Южный); 17 – контакты разновозрастных пород; 18 – фациальные контакты; 19 – контуры гидротермально-метасоматических пород; 20 – фумарольные поля и их номера (1 – низкотемпературные поля кратера Южный, 2 – Рениевое, 3 – Поле 605 (Молибденовое), 4 – Купол, 5 – Главное, 6 – Ангидритовое); 21 – воронки взрыва, в том числе эродированные.

производились по логарифмам их содержаний. С температурой теснее всего положительно коррелирует $\lg H_2$ (коэффициент корреляции +0.95), значимую положительную корреляцию проявляют также SO_2 (+0.56), H_2S (+0.49), HCl (+0.62), $\lg CO$ (+0.79), $\lg HF$ (+0.69). Отрицательную корреляцию с температурой показывает H_2O (-0.67) и более слабую отрицательную – $\lg CH_4$ (-0.39).

Прямая зависимость содержаний водорода от температуры проявляется как в целом, в совокупности полей с разными температурами, так и в отдельных полях (фиг. 3а); похожую зависимость демонстрирует содержание CO . По кислым газам (SO_2 , H_2S , HCl , HF) прямая зависимость содержания от температуры менее тесная и проявляется не в пределах отдельных полей, а в виде различий средних содержаний в полях с разными тем-



Фиг. 3. Зависимость содержаний H_2 (а) и HCl (б) от температуры фумарольных газов вулкана Кудрявый. По данным работ (Taran et al., 1995; Чаплыгин, 2009). Фумарольные поля: 1 – низкотемпературные поля кратера Южный, 2 – Ренивое, 3 – Поле 605, 4 – Купол, 5 – Главное.

пературами газов, что видно на примере HCl (фиг. 3б).

Таким образом, макросостав фумарольных газов определяется, главным образом, их температурой. В более горячих фумаролах присутствуют более высокие содержания H_2 , SO_2 , H_2S , HCl , HF , CO ; за счет возрастания их количеств уменьшается процентное содержание H_2O , при этом снижается также содержание CH_4 . В свою очередь, содержания CO_2 , N_2 , O_2 , Ar в фумарольных газах не проявляют статистически значимой связи с их температурами.

Большинство имеющихся данных по микроэлементному составу фумарольных газов представляют собой содержания элементов в конденсатах, полученных с помощью шарикового холодильника либо колбы Гиггенбаха с NH_4OH , с добавлением того количества элементов, которое приходится на осадок при его существенном количестве в конденсате (Чаплыгин, 2009; Кременецкий, Чаплыгин, 2010). В предположении, что микроэлементы не теряются по мере их транспортировки газовым потоком из фумаролы в устройство пробоотбора и полностью переходят в конденсат и осадок, полученные содержания (массовые доли) эквивалентны содержаниям в фумарольном газе. Результаты показывают достаточно высокую степень концентрирования ряда элементов, в том числе редких и редчайших, в высокотемпературных фумарольных газах: Re – до 22 ppb, In – до 42 ppb, Ge – до 306 ppb, Te – до 260 ppb и т.д. При этом, с учетом возможных все же потерь элементов за счет частичного осаждения в газоотборных трубках, шлангах и на стенках холодильника, а также в связи с контактом с атмосферным воздухом на

выходе из холодильника, полученные уровни содержаний микроэлементов следует признать минимальными, поскольку использованный способ получения и анализа конденсатов может приводить только к занижению истинных содержаний, но не к их завышению (Чаплыгин, 2009; Кременецкий, Чаплыгин, 2010).

С другой стороны, содержания элементов в фумарольных газах, определявшиеся методом отбора проб аэрозолей с помощью адсорбентов и анализа адсорбентов (работы ИВиГ под руководством Г.С. Штейнберга 1993–2001 гг.), по рению и его спутникам достигали значений на 2–3 порядка выше. Возможно, это было связано как с несовершенством опробовательских и аналитических процедур, так и с тем обстоятельством, что применявшиеся в этом методе фильтры-сорбенты улавливали рений и другие элементы не только и не столько из парогазовой составляющей, сколько из потока твердых частиц пылевой размерности, несомых потоками фумарольных газов. По этой причине, если рассматривать микроэлементный состав именно газовой фазы, более достоверными следует признать данные, полученные методом конденсирования фумарольных газов.

Обзор данных, которые были получены методом конденсирования и представлены в работах (Taran et al., 1995; Чаплыгин, 2009; Кременецкий, Чаплыгин, 2010), позволяет прийти к заключению, что наибольшие содержания Re и ряда сопутствующих элементов, таких как Mo , In , Sn , Zn , Bi , Cd , Pb , Tl , Cs , Rb , Sb , Ge , Cu , наблюдаются, как правило, в наиболее горячих газах высокотемпературных фумарольных полей, чаще всего в самых горячих газах полей Купол и Главное. По-

этому можно говорить о прямой, хотя и не обязательно линейной статистической зависимости содержаний указанных элементов от температуры фумарольного газа.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При площадном литогеохимическом опробовании вулканогенных отложений кратерной части вулкана Кудрявый в 2015 г. пробы отбирались по сети 25×25 м из закопшек, пройденных с помощью титановой лопаты, с глубин 20–40 см от дневной поверхности. Опробовались современные рыхлые вулканогенные образования (вулканогенный грунт), включая отложения внутри действующих и потухших фумарол. Масса проб составляла 0.5–1.0 кг, чтобы обеспечить при расसेве выход анализируемой фракции < 1 мм не менее 150–200 г. Прокладка маршрутов геохимического опробования осуществлялась по GPS. В случае обнаружения на маршруте между плановыми точками особых образований (например, отдельных фумарол) ставились дополнительные точки опробования с соответствующей привязкой. Пробоотбор в каждой точке сопровождался измерением температуры грунта в месте его опробования (в закопшке) с помощью пирометров GM-900, SEN-TECH Item 60725 и Testo 835-T2, т.е. одновременно с литогеохимической съемкой по той же сети была проведена температурная съемка. Всего на участке детальных работ размером приблизительно 750×400 м, фактическая площадь которого составила 0.32 км^2 , было отобрано 500 литогеохимических проб рыхлых вулканогенных отложений. Кроме того, было отобрано 70 штучных проб каменного материала, одна часть которых характеризует метасоматиты фумарольных полей, в том числе с вкрапленной сульфидной минерализацией, другая часть – типичные вулканические породы. Были также проведены детализационные температурные съемки Рениевого поля и Поля 605 по более плотной сети наблюдений: на Рениевом поле средняя плотность сети составила 6×6 м, в южной половине Поля 605 – 2.5×2 м (в северной половине съемка не проводилась). В ходе маршрутов с помощью дозиметра ДРГ-01Т производились выборочные измерения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД); все полученные значения МЭД лежат в пределах 7–15 мкР/ч, что соответствует нормальному природному фону.

Химико-аналитические работы, выполненные в лаборатории АО “СЖС Восток Лимитед” (группа “SGS”), включали истирание проб, определение Au, а также Pt и Pd (только в каменном материале) пробирным анализом с ICP-AES окончанием (шифры методик FAI505 и FAI515) и определение 51 элемента: Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Cs, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K,

La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr – методом ICP-AES/MS с микроволновым автоклавым вскрытием проб смесью хлорной, соляной, азотной и плавиковой кислот (шифр методики ICM40B).

При обработке полученных данных использовались методы статистического анализа, а также выполнялось построение карт по результатам площадных геохимической и температурной съемок.

Минеральный состав измененных фумаролами вулканических пород изучался методами оптической микроскопии в проходящем и отраженном свете и сканирующей электронной микроскопии (SEM) в сочетании с электронно-зондовым микроанализом (EPMA) отдельных минеральных зерен на электронном микроскопе Jeol JSM 6510LA, снабженном энергодисперсионной приставкой (аналитик О.Л. Галанкина, ИГД РАН).

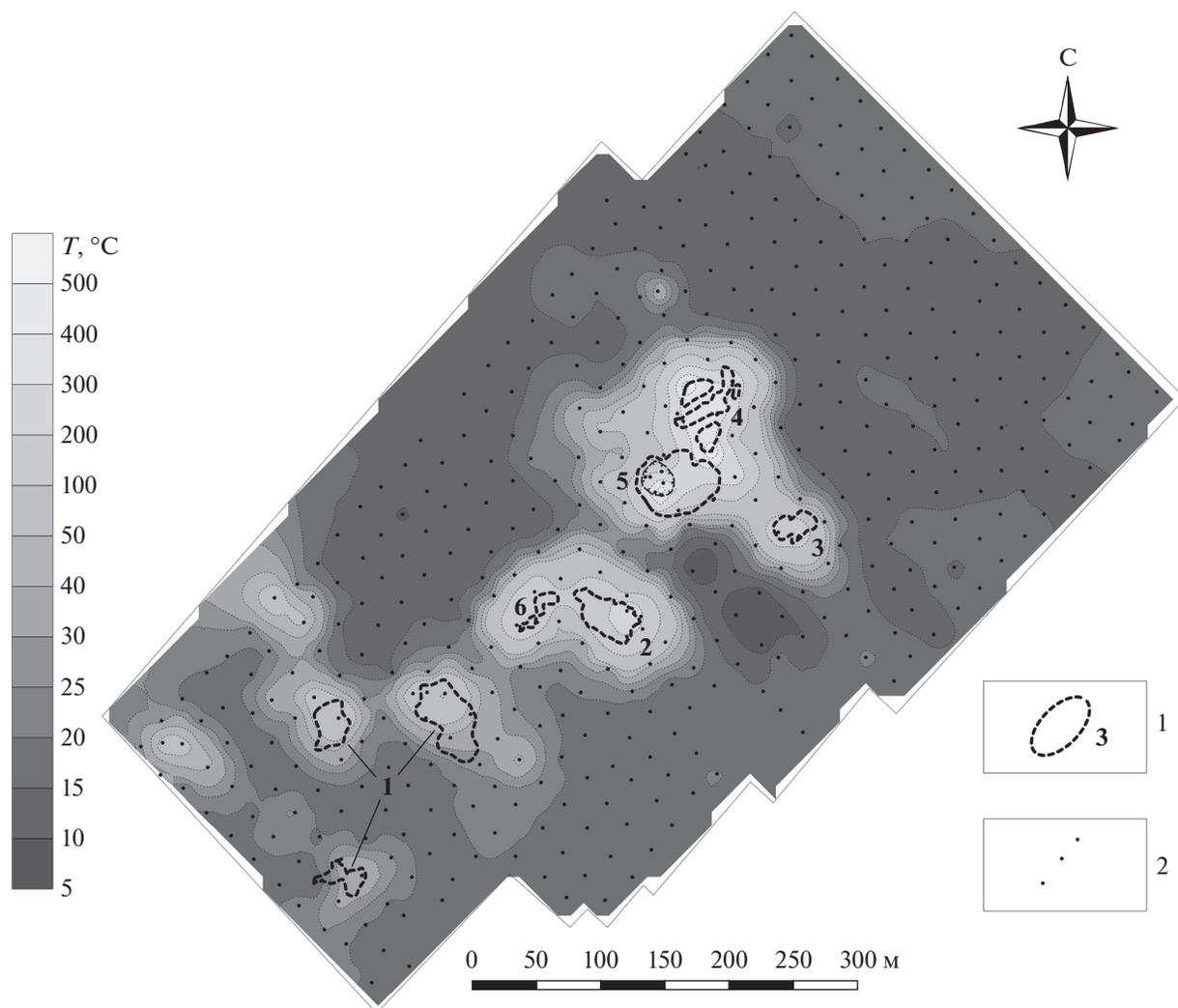
РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СЪЕМКИ

На карте температур приповерхностного слоя вулканогенных грунтов (20–40 см от дневной поверхности) выделились все известные фумарольные поля (фиг. 4), из которых наиболее горячим является поле Купол, смыкающееся в своей южной части с полем Главное, в пределах которого в 1999 г. образовался кратер последнего фреатического извержения. Максимальная температура вулканогенных отложений в 2015 г. была зафиксирована в фумарольном поле Купол и составила около 600°C . Заметим, что температура измерялась в закопшках, которые были предназначены для отбора проб вулканогенных отложений и открыты с поверхности. Это приводило к снижению температуры по сравнению с нескрытыми грунтами, поэтому истинная температура приповерхностного нескрытого слоя грунтов на глубинах 20–40 см должна быть выше. Были выявлены также новые низкотемпературные фумарольные поля, из которых достаточно контрастно проявлены три поля, расположенные на северном и западном склонах низкотемпературного кратера Южный и к северу от поля Купол.

По результатам детализационных температурных съемок, выполненных на Рениевом поле и в южной половине Поля 605, в отдельных точках были зафиксированы следующие максимальные значения температуры грунта: на первом из них – 516°C , на втором – 687°C .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Результаты площадной литогеохимической съемки рыхлых отложений, проведенной в кратерной части вулкана Кудрявый и дополненной выборочным опробованием кристаллических по-



Фиг. 4. Карта температуры приповерхностного слоя вулканогенных грунтов кратерной части вулкана Кудрявый. 1 – главные фумарольные поля (1 – низкотемпературные поля кратера Южный, 2 – Рениевое, 3 – Поле 605, 4 – Купол, 5 – Главное, 6 – Ангидритовое); 2 – точки измерения температуры и опробования рыхлых отложений.

род, показывают, что ряд элементов в твердых образованиях активных фумарол достигает высоких концентраций, сопоставимых с содержаниями в промышленных рудных месторождениях. Это Re, Au, Ag, As, Bi, Cd, Cu, In, Mo, Pb, S, Sb, Se, Sn, Te, Tl, W, Zn; вместе с ними накапливаются, хотя и не демонстрируют высоких концентраций, Ge, Rb, Cs – всего 21 элемент (табл. 1). Этот перечень включает все те элементы, содержания которых в фумарольных газах, как было отмечено выше, находятся в прямой зависимости от температуры газов. Следовательно, указанные элементы привносятся восходящими парогазовыми фумарольными потоками и, выделяясь из них на геохимических барьерах, существующих вблизи дневной поверхности и непосредственно на ней (прежде всего, на барьере падения температуры и контакта с атмосферным воздухом), накапливаются в отложениях

активных фумарол, формируя литогеохимические аномалии эксгальационного генезиса.

Интенсивные площадные аномалии вышеуказанных элементов в вулканогенных отложениях связаны с высокотемпературными фумарольными полями, причем самые контрастные аномалии большинства металлов соответствуют полю Купол, которое, наряду с полем Главное, является более горячим, чем Поле 605, и еще более горячим, чем Рениевое поле. Это видно, в частности, по рению при сравнении карты содержаний рения в твердых вулканогенных образованиях (фиг. 5) с картой температуры приповерхностного слоя вулканогенных грунтов (см. фиг. 4). Наиболее интенсивная площадная аномалия рения соответствует полю Купол, с ней смыкаются вторая по интенсивности аномалия Поля 605 и аномалия Главного поля. Вместе они создают достаточно

Таблица 1. Статистические параметры распределения содержаний элементов в опробованных кристаллических породах и вулканогенных рыхлых отложениях вулкана Кудрявый

| Хим. элемент | Ед. изм. | Кристаллические породы (70 проб) | | | Рыхлые отложения (500 проб) | | |
|--------------|----------|----------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|
| | | C _{min} | C _{me} | C _{max} | C _{min} | C _{me} | C _{max} |
| Au | ppm | <0.005 | <0.005 | 0.216 | <0.005 | <0.005 | 1.17 |
| Ag | » | <0.02 | 0.05 | 20 | <0.02 | 0.23 | 23.4 |
| Al | мас. % | 0.07 | 7.685 | 14.4 | 0.12 | 2.86 | 14.5 |
| As | ppm | <1 | 11.5 | 4080 | 2 | 46 | 2120 |
| Ba | » | <5 | 148 | 833 | 6 | 153 | 1240 |
| Be | » | <0.1 | 0.35 | 3.7 | <0.1 | 0.2 | 0.4 |
| Bi | » | <0.04 | 1.125 | 3160 | <0.04 | 4.41 | 744 |
| Ca | мас. % | 0.01 | 4.08 | 13.1 | 0.03 | 1.09 | >15 |
| Cd | ppm | <0.02 | 0.24 | 4060 | <0.02 | 0.14 | 269 |
| Ce | » | 0.07 | 8.9 | 48.3 | 0.1 | 5.62 | 50.6 |
| Cs | » | <0.05 | 0.775 | 104 | <0.05 | 1.08 | 38.6 |
| Cr | » | 2 | 64.5 | 315 | 2 | 21 | 225 |
| Co | » | 0.3 | 18.3 | 98.9 | 0.1 | 9.9 | 116 |
| Cu | » | 1.8 | 45.4 | 652 | 3.7 | 50.2 | 2660 |
| Fe | мас. % | 0.06 | 5.935 | 13.6 | 0.12 | 3.67 | >15 |
| Ga | ppm | 0.2 | 14.85 | 116 | 0.4 | 7.5 | 64.8 |
| Ge | » | <0.1 | <0.1 | 2 | <0.1 | 0.1 | 8.3 |
| Hf | » | 0.1 | 1.615 | 4.82 | 0.18 | 2.19 | 5.16 |
| In | » | <0.02 | 0.155 | >500 | <0.02 | 0.365 | 108 |
| K | мас. % | <0.01 | 0.48 | 5 | <0.01 | 0.39 | 1.66 |
| La | ppm | <0.1 | 3.2 | 18 | <0.1 | 2.25 | 17.6 |
| Li | » | <1 | 5 | 133 | <1 | 4 | 14 |
| Lu | » | <0.01 | 0.355 | 0.92 | <0.01 | 0.2 | 1.12 |
| Mg | мас. % | <0.01 | 1.865 | 5.47 | <0.01 | 0.945 | 4.2 |
| Mn | ppm | 2.5 | 831 | 2270 | 12 | 480.5 | 1860 |
| Mo | » | 0.56 | 3.03 | >10000 | 0.74 | 14.5 | 8870 |
| Na | мас. % | 0.02 | 1.425 | 3.9 | 0.03 | 0.6 | 2.5 |
| Nb | ppm | <0.1 | 0.6 | 1.5 | <0.1 | 1 | 4.6 |
| Ni | » | <0.5 | 8.9 | 123 | <0.5 | 5.3 | 82.1 |
| P | » | <50 | 370 | 930 | <50 | 250 | 1120 |
| Pb | » | 0.6 | 10.15 | 8840 | <0.5 | 22.8 | >10000 |
| Rb | » | <0.2 | 8.4 | 490 | 0.3 | 7.9 | 118 |
| S | мас. % | <0.01 | 0.94 | >5 | 0.05 | 0.675 | >5 |
| Sb | ppm | 0.08 | 0.415 | 51.2 | 0.2 | 1.39 | 24.1 |
| Sc | » | <0.5 | 36.85 | 57.4 | <0.5 | 19.1 | 251 |
| Se | » | <2 | 2 | 293 | <2 | 11 | 205 |
| Sn | » | 0.3 | 1.35 | 338 | 0.6 | 4.3 | 889 |
| Sr | » | 1.4 | 213 | 1430 | 2 | 66.75 | 1500 |
| Ta | ppm | <0.05 | 0.09 | 0.64 | <0.05 | 0.2 | 0.96 |
| Tb | » | <0.05 | 0.505 | 1.71 | <0.05 | 0.28 | 2.09 |
| Te | » | <0.05 | 0.675 | 163 | 0.11 | 2.485 | 108 |
| Th | » | <0.2 | 0.8 | 2.9 | <0.2 | 0.6 | 4.4 |
| Ti | мас. % | 0.01 | 0.42 | 0.84 | 0.09 | 0.64 | 2.96 |

Таблица 1. Окончание

| Хим. элемент | Ед. изм. | Кристаллические породы (70 проб) | | | Рыхлые отложения (500 проб) | | |
|--------------|----------|----------------------------------|-----------------|------------|-----------------------------|-----------------|------------|
| | | C_{\min} | $C_{\text{ме}}$ | C_{\max} | C_{\min} | $C_{\text{ме}}$ | C_{\max} |
| Tl | ppm | <0.02 | 0.3 | 125 | 0.02 | 2.235 | 343 |
| U | » | <0.1 | 0.3 | 1.2 | <0.1 | 0.2 | 0.6 |
| V | » | 1 | 262.5 | 502 | 2 | 168 | 655 |
| W | » | <0.1 | 0.6 | 1370 | <0.1 | 1.5 | 274 |
| Y | » | <0.1 | 17.6 | 58.9 | 0.2 | 9.55 | 59.8 |
| Yb | » | <0.1 | 2.2 | 6.1 | <0.1 | 1.3 | 6.8 |
| Zn | » | 5 | 72.5 | 7220 | 5 | 46.5 | 550 |
| Zr | » | 2.9 | 46.6 | 140 | 4.3 | 58.55 | 152 |
| Re | » | <0.05 | <0.05 | 82.7 | <0.05 | 0.07 | 405 |
| Pt | » | <0.01 | <0.01 | 0.01 | н.а. | н.а. | н.а. |
| Pd | » | <0.005 | <0.005 | <0.005 | н.а. | н.а. | н.а. |

Примечание. C_{\min} , $C_{\text{ме}}$, C_{\max} – минимальное, медианное, максимальное значения содержания соответственно; н.а. – нет анализов.

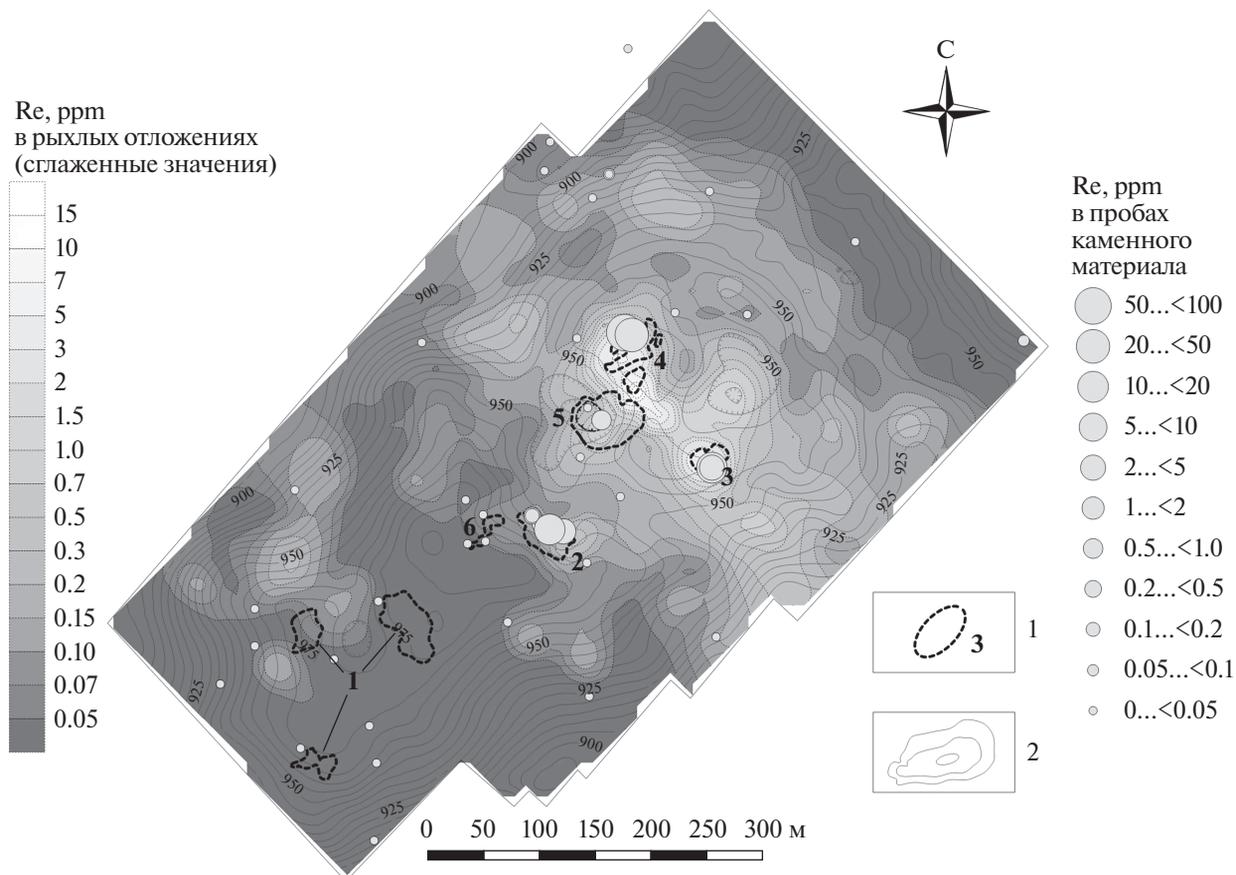
обширное аномальное геохимическое поле рения, охватывающее северо-восточную вершину вулкана Кудрявый (кратер Тукап). Менее интенсивная аномалия рения, которая меньше как по размеру, так и по уровню концентраций, соответствует Рениевому полю внутри одноименного кратера. Несколько слабokonтрастных аномалий расположены по периферии интенсивного аномального поля на склонах северо-восточной вершины вулкана, а также в районе низкотемпературных фумарольных полей на склонах юго-западной вершины (кратер Южный).

Практически все высокие содержания рудных элементов в опробованных кристаллических породах, как и в рыхлых отложениях, зафиксированы в высокотемпературных фумарольных полях. При этом максимальные содержания Re, Au, Ag, Cu, In, Sn, Tl, Te в отдельных пробах (численные значения см. в табл. 1) выявлены в наиболее горячих полях Купол и Главное, Mo, W, Zn, Ge – в Поле 605, As, Bi, Cd, In, Pb, Sb, Se – в Рениевом поле. Отметим также, что аномально повышенные содержания ряда рудных элементов зафиксированы и в пробах каменного материала, отобранных на северо-восточном склоне потухшего вулкана Средний: Re – до 0.18 ppm, Au – до 0.02 ppm, Ag – до 0.21 ppm, As – до 50 ppm, Cu – до 105 ppm, In – до 0.2 ppm, Mo – до 54 ppm, Se – до 13 ppm, Te – до 4.3 ppm. Несмотря на то что эти содержания существенно ниже, чем на действующем вулкане Кудрявый, можно предположить, что на вулкане Средний в недавнем геологическом прошлом протекали аналогичные процессы формирования эксгальационной рудной минерализации. Принимая во внимание, что на вулкане Средний было отобрано всего лишь 8 проб, можно ожидать, что

при систематическом опробовании будут обнаружены более высокие содержания указанных элементов в отложениях палеофумарольных полей.

По результатам факторного анализа геохимических данных, как по кристаллическим породам, так и по рыхлым отложениям (табл. 2), группа элементов, интенсивно накапливающихся в твердых фумарольных образованиях, подразделяется на две ассоциации. В первой (фактор 2) главную роль играют In, Cd, Mo, Sn, Re, W, Tl, Au, Bi, Pb, к ним тяготеют Ag, Cu и Zn – эта ассоциация связана с наиболее высокотемпературными условиями образования эксгальационной минерализации. Во второй ассоциации (фактор 3) главную роль играют Te, Se, As, Sb, S – эта ассоциация связана с менее высокими температурами формирования минерализации. Эти две ассоциации в целом положительно коррелируют между собой – прежде всего благодаря элементам, входящим одновременно в ту и другую ассоциации (Sn, Pb, Bi, Tl, As, Sb).

Подразделение элементов на две ассоциации: наиболее высокотемпературную (Au, Re, Mo, W, Ag, Cu, Bi, Tl, Sn, Cd, In, Pb) и обусловленную менее высокими температурами формирования эксгальационной минерализации (As, Te, Se, Sb, S) – демонстрируют и результаты R-модификации кластерного анализа данных по рыхлым отложениям (фиг. 6), при этом Ge тяготеет к наиболее высокотемпературной ассоциации. Почти все остальные элементы, занимающие левую часть кластерной диаграммы, являются антагонистами элементов этих двух ассоциаций, обусловленных эксгальационной минерализацией.



Фиг. 5. Карта содержаний рения в твердых вулканогенных образованиях кратерной части вулкана Кудрявый. Главные фумарольные поля (1 – низкотемпературные поля кратера Южный, 2 – Рениевое, 3 – Поле 605, 4 – Купол, 5 – Главное, 6 – Ангидритовое); 2 – изогипсы рельефа.

РЕЗУЛЬТАТЫ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты минералогических исследований образцов, отобранных в 2015 г. из фумарольных полей Рениевое, Поле 605 и Купол, показали, что рудная минерализация фумарольных отложений распределена неравномерно и представлена: (а) мелкими вкрапленными кристаллами и отдельными зернами; (б) тонкими корками и агрегатами, обрастающими кластические зерна и поры; (в) тонкими прожилками совместно с другими фазами. Минеральный состав преимущественно представлен пиритом, в зонах окисления – гематитом и гетитом, а также зернами магнетита. Из других сульфидных минералов диагностированы галенит, халькопирит, сфалерит, пирротин, гринокит, висмутин, Cu–In–Cd–Bi фазы (висмутосодержащий рокезит; возможно, кадмоиндит и др.). Большинство редких фаз диагностированы в поле Купол, в том числе бисмоклит (BiOCl). Кристаллы и зерна минералов In, Cd, и Bi имеют размеры от первых до десяти микрометров (фиг. 7). Ренийсодержащие фазы в исследованных образцах не

были выявлены, однако следует отметить, что некоторые фазы не удалось однозначно идентифицировать по той причине, что они представлены срастаниями размером не более нескольких микрометров. Поскольку при содержании рения на уровне десятков ppm можно было ожидать наличия собственных минеральных фаз этого металла, остается предположить, что они присутствуют как раз в составе тонкой, не диагностированной использованным методом вкрапленности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Природа литогеохимических аномалий

Литогеохимические аномалии эксгальационного генезиса в рыхлых вулканогенных отложениях кратерной части вулкана Кудрявый, выявленные по результатам площадной литогеохимической съемки, представляют собой не типичные для практики поисковой геохимии вторичные ореолы рассеяния, а литогеохимические ореолы более сложного генезиса. Они начали формироваться с началом активной деятельности вулкана и продолжают формироваться по сей день в результате воз-

Таблица 2. Факторные нагрузки по результатам факторного анализа с варимаксным вращением осей, выполненного по логарифмам содержаний элементов в рыхлых отложениях кратерной части вулкана Кудрявый

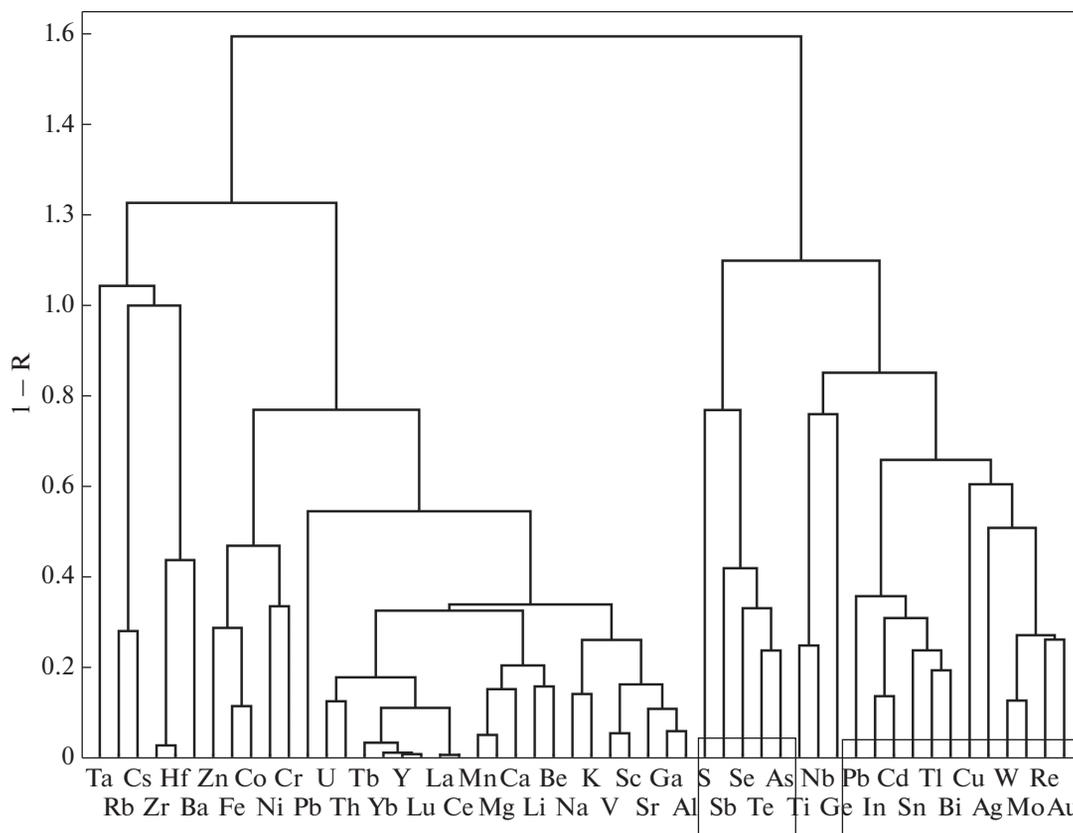
| Хим. эл. | Факторы | | | Хим. эл. | Факторы | | |
|----------|-------------|-------------|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 |
| lgAu | -0.37 | 0.74 | | lgNa | 0.90 | | |
| lgAg | | 0.50 | | lgNb | | 0.36 | |
| lgAl | 0.85 | -0.34 | | lgNi | 0.67 | | |
| lgAs | | 0.46 | 0.80 | lgP | 0.57 | -0.30 | |
| lgBa | | | | lgPb | | 0.72 | 0.36 |
| lgBe | 0.89 | | | lgRb | 0.51 | | |
| lgBi | | 0.72 | 0.54 | lgS | -0.41 | | |
| lgCa | 0.91 | | | lgSb | | 0.45 | 0.66 |
| lgCd | | 0.85 | | lgSc | 0.94 | | |
| lgCe | 0.90 | | | lgSe | | 0.26 | 0.79 |
| lgCs | | 0.58 | | lgSn | -0.31 | 0.82 | 0.32 |
| lgCr | 0.66 | | | lgSr | 0.86 | | |
| lgCo | 0.81 | | | lgTa | | | |
| lgCu | | 0.50 | | lgTb | 0.92 | | |
| lgFe | 0.86 | | | lgTe | | 0.29 | 0.81 |
| lgGa | 0.87 | -0.27 | | lgTh | 0.85 | | |
| lgGe | | 0.28 | | lgTi | -0.30 | 0.33 | |
| lgHf | 0.29 | | | lgTl | | 0.76 | 0.49 |
| lgIn | | 0.91 | | lgU | 0.82 | | |
| lgK | 0.81 | | | lgV | 0.90 | | |
| lgLa | 0.89 | | | lgW | | 0.77 | |
| lgLi | 0.87 | | | lgY | 0.90 | | |
| lgLu | 0.91 | | | lgYb | 0.90 | | |
| lgMg | 0.92 | | | lgZn | 0.68 | 0.44 | |
| lgMn | 0.91 | | | lgZr | 0.31 | | |
| lgMo | -0.28 | 0.83 | | lgRe | | 0.77 | |
| Вес, % | 38.7 | 17.3 | 6.8 | Вес, % | 38.7 | 17.3 | 6.8 |

Примечание. Нагрузки, превышающие 0.60, выделены жирным шрифтом; нагрузки, абсолютная величина которых менее 0.25, в таблице не показаны.

действия на рыхлые образования восходящих фумарольных парогазовых флюидов (эндогенный источник). Главный процесс их формирования заключается не в рассеянии, а в концентрировании рудных элементов, что является главным свойством не вторичных, а первичных литогеохимических ореолов.

С другой стороны, одновременно с продолжающимся привнесом и накоплением элементов в рыхлом покрове кратерной части вулкана происходит также рассеяние накопившегося вещества за счет двух главных экзогенных процессов. Первый из них — это повсеместно распространенное механическое рассеяние твердых частиц рыхлых

отложений в результате действия двух вариантов механической миграции: квазидиффузии (ненаправленного перемешивания и спонтанного перемещения частиц) и направленного гравитационного перемещения частиц вниз по склонам. Это типичные механизмы формирования вторичных литогеохимических ореолов рассеяния в условиях преобладания механической миграции элементов. Второй процесс — это аэрогенное рассеяние. Он заключается в том, что из выбрасываемых фумаролами в атмосферу парогазовых смесей с пылеватыми частицами происходит осаждение рудных элементов на дневную поверхность в составе твердых и жидких выпадений. Дополнительный



Фиг. 6. Дендрограмма кластерного анализа геохимических данных (логарифмы содержаний элементов) по рыхлым вулканогенным отложениям кратерной части вулкана Кудрявый. R – коэффициент корреляции. В рамки заключены главные ассоциации рудных элементов эксгальационной минерализации.

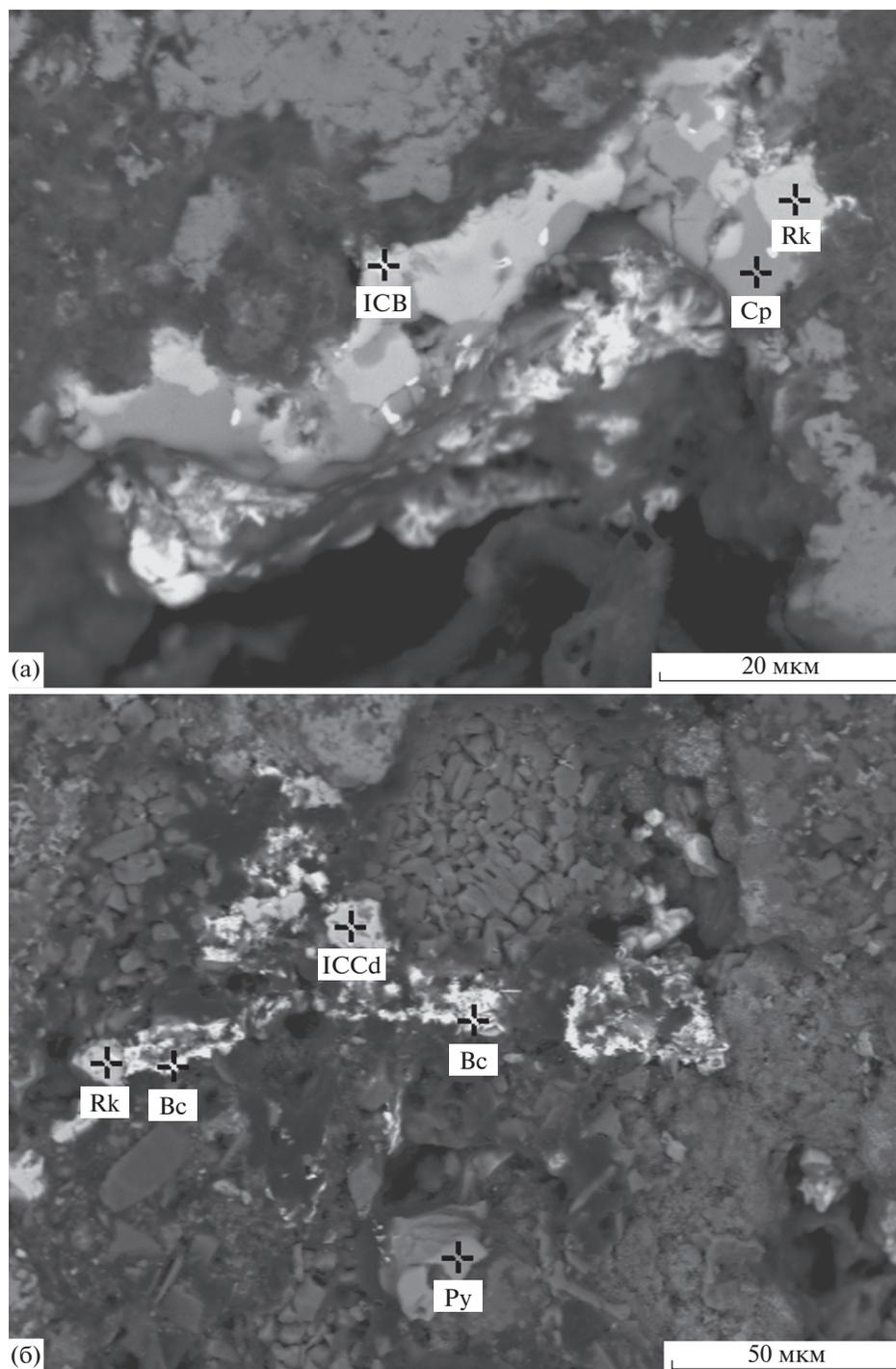
аэрогенный механизм рассеяния – это перевевание ветрами поверхностных слоев рыхлого покрова вулкана с перетолжением твердых частиц. За счет и того, и другого процессов происходит рассеяние рудных элементов из их фумарольных источников в окружающие рыхлые образования и, в конечном счете, из кратерной части вулкана на его склоны. Процессы твердофазного механического рассеяния внутри рыхлых отложений и аэрогенного рассеяния – это процессы формирования вторичных литогеохимических ореолов.

Таким образом, литогеохимические аномалии в кратерной части вулкана Кудрявый представляют собой эндогенно-экзогенные ореолы смешанной природы, сочетающие в себе свойства как первичных, так и вторичных ореолов эксгальационной рудной минерализации. Чем ближе к источнику (современной или бывшей фумароле), тем больше роль процесса первичного концентрирования рудных элементов, и ореол преимущественно является первичным по своей природе. И, наоборот, в стороне от современного или палеофумарольного источника определяющими оказываются процессы вторичной миграции рудных элементов, и литогеохимический ореол оказывается типичным вторичным

ореолом рассеяния. Все вышесказанное имеет значение для правильной интерпретации литогеохимических аномалий в вулканогенных отложениях.

Геохимическая зональность

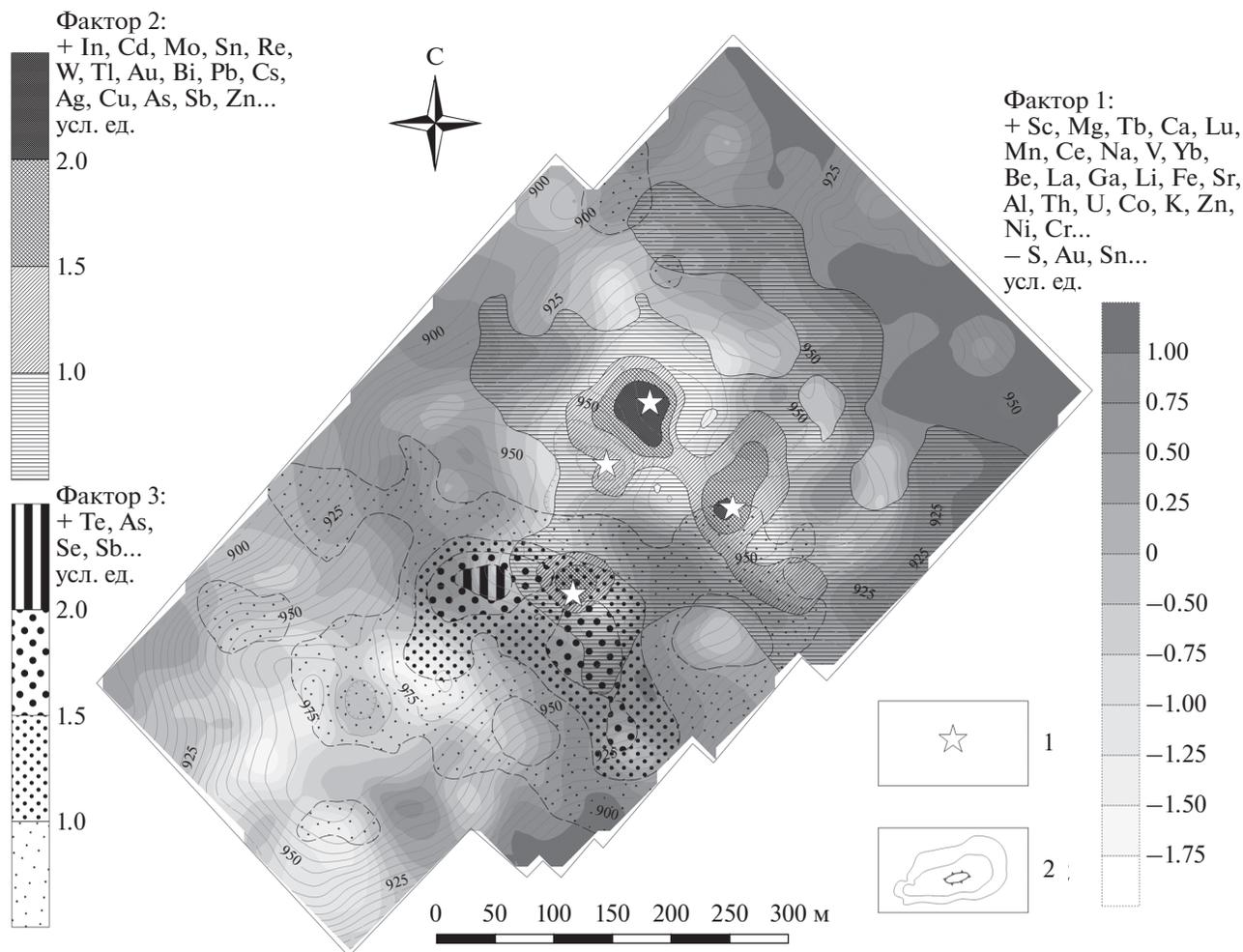
При сравнении моноэлементных геохимических карт, построенных по содержаниям разных элементов, отчетливо проявляется пространственная зональность размещения аномалий разных элементных ассоциаций и ее обусловленность температурами фумарольных полей. С самыми горячими фумарольными полями Купол, Поле 605, Главное, в меньшей степени с Рениевым полем связаны аномалии Re, Mo, W, Au, Cu и Ag (медь, серебро и золото образуют также слабые аномалии в районе низкотемпературных фумарол). Там же наблюдаются контрастные аномалии In, локальные аномалии Zn, слабые аномалии Cs и Ge. Для Рениевого поля, в меньшей степени для полей Купол и 605, характерны контрастные аномалии Bi, Cd, Pb, Sn, Tl. С Рениевым и Ангидритовым полями, а также, в существенно меньшей степени, с полями 605 и Купол, связаны аномалии As, Sb, Se, Te. Эти элементы образуют



Фиг. 7. Рудные минералы в породах поля Купол (SEM-BSE, контраст в обратно-рассеянных электронах). а – халькопирит (Cp), рокезит (Rk), In–Cu–Bi сульфид (возможно, рокезит в сростании с Bi фазой) (ICB); б – рокезит (Rk), In–Cu–Cd сульфид (предположительно, рокезит в сростании с кадмоиндитом или гринокитом) (ICCd), бисмоклит (Bc), пирит (Py).

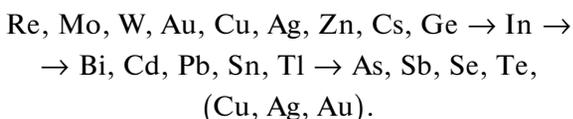
также слабые аномалии в низкотемпературных fumarольных полях на юго-западе опороискованной площади. Сера распространена как в низкотемпературных полях, так и в менее горячих частях высокотемпературных полей на их периферии.

Установленную латеральную геохимическую зональность в направлении с северо-востока на юго-запад, от высокотемпературных полей Купол и Главное в сторону низкотемпературных полей, можно представить следующим рядом, кото-



Фиг. 8. Карта значений факторов – полиэлементных показателей состава рыхлых отложений кратерной части вулкана Кудрявый. 1 – центры высокотемпературных фумарольных полей; 2 – изогипсы рельефа.

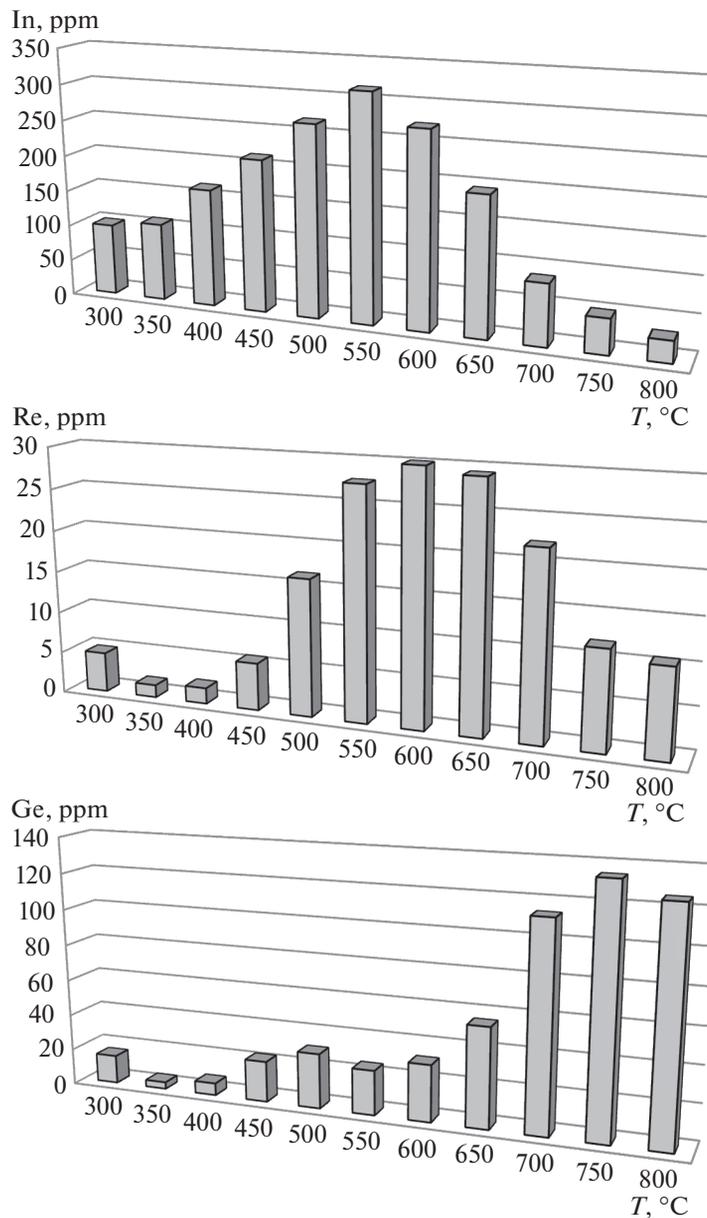
рый отражает зональность размещения эксгальационной рудной минерализации от наиболее высокотемпературной к минерализации, формирующейся при меньших температурах:



Эта латеральная литогеохимическая зональность кратерной части вулкана Кудрявый отражается на карте полиэлементных показателей (фиг. 8), в качестве которых выступают значения соответствующих факторов (см. табл. 2). В северо-восточной и юго-западной частях изученной территории по пониженным значениям фактора 1 выделяются области интенсивного выноса породообразующих (Mg, Ca, Na, Fe, Al, K) и малых петрогенных (Sc, Tb, Lu, Ce, V, Yb и др.) элементов, обусловленного кислотным выщелачиванием элементов, не привносимых фумарольными

газами, в процессе фумарольной деятельности. По anomalно высоким значениям фактора 2 выделяется область главного накопления элементов наиболее высокотемпературной минерализации. По аномалиям повышенных значений фактора 3 оконтуривается область главного накопления элементов эксгальационной минерализации, связанной с меньшими температурами активных фумарол. Не исключено, что в пределах юго-западной половины опосредованного участка, под аномалиями элементов средне-низкотемпературной ассоциации на некоторой глубине, ближе к источнику тепла, может располагаться минерализация Re, Mo, W, Au, Cu, Ag, In, Ge и других элементов наиболее высокотемпературной ассоциации.

Латеральная литогеохимическая зональность, которая отражает зональность размещения эксгальационной рудной минерализации в кратерной части вулкана Кудрявый, обусловлена, в первую очередь, различиями температур фумарольных газов.



Фиг. 9. Средние содержания In, Re и Ge в фумарольных корках вулкана Кудрявый при разных температурах фумарольных газов.

Содержания элементов, привносимых в вулканогенный грунт фумарольными газами, имеют положительные коэффициенты корреляции с температурой грунта, а отрицательные корреляции содержания породообразующих (Mg, Al, K, Na, Ca, Fe) и малых петрогенных (Sc, Yb, Ga, PЗЭ, Y, V и др.) элементов с температурой грунта обусловлены их кислотным выщелачиванием и выносом из отложений горячих фумарол.

Ранее в 1994–1995 гг. при поисково-оценочных работах ИВиГ по оценке запасов рения на рудопроявлении вулкана Кудрявый в пределах Рениевого поля и Поля 605 было проведено детальное опро-

бование фумарольных корок, представляющих собой метасоматиты с эксгальационной минерализацией, которая развивается преимущественно на поверхностях полостей и по трещинкам. Опробование сопровождалось измерением температур эманулирующих газов. Отбирались точечные, горстевые и пунктирно-бороздовые пробы, общее количество которых составило на Рениевом поле – 178, на Поле 605 – 66 проб. Все пробы были проанализированы на Re, In и Ge. Переобработка данных этого опробования показала, что содержания всех трех элементов имеют значимые положительные коэффициенты корреляции с температурой, од-

нако зависимость существенно отклоняется от линейной. Это вызвано тем, что каждый из трех рассматриваемых элементов имеет четко выраженные температурные интервалы максимального отложения из фумарольных газов: германий наиболее интенсивно отлагается при температурах 700–800°C, рений – 550–650°C, индий – 500–600°C (фиг. 9). Следовательно, температурный ряд отложения этих элементов из фумарольных газов, от самых высоких температур к менее высоким, выглядит следующим образом:



Таким образом, в кратерной части вулкана Кудрявый литогеохимическая зональность обусловлена двумя главными причинами. Первая – это содержания рудных элементов в горячих фумарольных газах, которые находятся в прямой зависимости от температуры. Вторая причина – это то, что оптимальные температурные интервалы отложения разных элементов из газов различаются. В результате в направлении с северо-востока на юго-запад, от самых горячих фумарольных полей к менее горячим, происходит смена высокотемпературных ассоциаций элементов в твердых фумарольных образованиях на средне- и низкотемпературные ассоциации. При этом Рениевое поле, температуры которого, измеренные в 2015 г., варьировали в пределах 220–520°C, является переходным между высокотемпературными и средне-низкотемпературными полями и характеризуется переходными ассоциациями рудных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главной геохимической особенностью вулканогенных отложений кратерной части вулкана Кудрявый является то, что в них прямо сейчас протекает процесс формирования эксгалационной рудной минерализации с накоплением в твердых вулканических образованиях Re, Au, Ag, As, Bi, Cd, Cu, Ge, In, Mo, Pb, S, Sb, Se, Sn, Te, Tl, W, Zn, Rb, Cs, которые привносятся высокотемпературными фумарольными газами и отлагаются из них при падении температуры в зоне контакта с приземной атмосферой. Зональное размещение литогеохимических аномалий ассоциаций указанных элементов отражает температурную зональность фумарольных полей и различия температурных интервалов отложения разных элементов из фумарольных газов. Выявлены признаки того, что сходные процессы формирования эксгалационной минерализации в недавнем геологическом прошлом происходили на соседнем потухшем вулкане Средний. Это позволяет предположить, что подобные процессы протекали и в пределах других вулканических систем сходного генезиса, сформировавшихся на острове Итуруп и других островах Курильской гряды. На актив-

ном вулкане Кудрявый освоение комплексного оруденения рения и других металлов вряд ли возможно в настоящее время по причине продолжающихся опасных вулканических явлений. Однако на прилегающей территории острова Итуруп и, возможно, на других островах Курильской гряды можно ожидать обнаружения комплексных рудных месторождений, которые сформированы вулканическими процессами, сходными с происходящими сейчас на вулкане Кудрявый.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность М.Л. Коробову за финансовую поддержку исследований, М.С. Воронову за участие в полевых геохимических работах на вулкане Кудрявый в 2015 г., П.Ю. Ковтуновичу за любезно предоставленную геологическую карту кратерной части вулкана Кудрявый, И.В. Чаплыгину за ценные критические замечания, Н.С. Бортникову за внимательное прочтение рукописи статьи и полезные советы по ее улучшению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горшков Г.С.* Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967.
- Государственная геологическая карта РФ масштаба 1 : 200000. Изд. 2-е. Серия Курильская. Листы L-55-XXII, XXVIII, XXXIV, XXIII, XXIX, XXXII, XXXIII, K-55-II. Объяснительная записка. Составители Ковтунович П.Ю. и др. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2002.
- Добровольская М.Г., Данченко В.Я., Бортников Н.С.* Сульфидная минерализация на Курильских островах: минеральные парагенезисы и геохимические особенности эндогенного процесса // Геология руд. месторождений. 1996. Т. 38. № 1. С. 54–75.
- Ермаков В.А., Штейнберг Г.С.* Вулкан Кудрявый и эволюция кальдеры Медвежья (о-в Итуруп, Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1999. Т. 21. № 3. С. 19–40.
- Жигулев В.В.* Глубинное строение вулкана Кудрявый (о. Итуруп) по сейсмическим данным // Вулканология и сейсмология. 2010. Т. 5. С. 45–54.
- Жигулев В.В., Аргентов В.В.* Сейсмические исследования на вулкане Кудрявый (о. Итуруп) // Строение земной коры и перспективы нефтегазоносности в регионах северо-западной окраины Тихого Океана. Т. 2. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО АН СССР, 2000. С. 7–27.
- Знаменский В.С., Коржинский М.А., Штейнберг Г.С., Ткаченко С.И., Якушев А.И., Лапутина И.П., Брызгалов И.А., Самотин Н.Д., Магазина Л.О., Кузьмина О.В., Органова Н.И., Рассулов В.А., Чаплыгин И.В.* Рений, ReS_2 – природный дисульфид рения из фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) // Записки ВМО. 2005. Т. 134. № 5. С. 32–40.
- Знаменский В.С., Лапутина И.П., Таран Ю.А., Якушев А.И.* Рудоотложение из высокотемпературных газовых струй вулкана Кудрявый, о. Итуруп, Курильские острова // ДАН. 1993. Т. 333. № 2. С. 227–230.

- Коржинский М.А., Бочарников Р.Е., Ткаченко С.И., Жданов Н.Н., Штейнберг Г.С.* Особенности фумарольной активности вулкана Кудрявый в период 1991-1999 гг. и фреатическое извержение 1999 г. // Петрология. 2002. Т. 10. № 6. С. 611–629.
- Коржинский М.А., Ткаченко С.И., Романенко И.М., Штейнберг Г.С., Шмулович К.И.* Геохимия и рениевая минерализация высокотемпературных газовых струй вулкана Кудрявый, остров Итуруп, Курильские острова // ДАН. 1993. Т. 330. № 5. С. 627–629.
- Кременецкий А.А., Чаплыгин И.В.* Содержание рения и редких металлов в газах вулкана Кудрявый (остров Итуруп, Курильские острова) // ДАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 365–370.
- Ткаченко С.И., Таран Ю.А., Коржинский М.А., Покровский Б.Г., Штейнберг Г.С., Шмулович К.И.* Газовые струи вулкана Кудрявый, о. Итуруп, Курильские острова // ДАН. 1992. Т. 325. № 4. С. 823–828.
- Ткаченко С.И., Портер Р.П., Коржинский М.А., Ван Берген М.Д., Шмулович К.И., Штейнберг Г.С.* Изучение процессов рудо- и минералообразования из высокотемпературных фумарольных газов на вулкане Кудрявый, остров Итуруп, Курильские острова // Геохимия. 1999. № 4. С. 410–422.
- Чаплыгин И.В.* Рудная минерализация высокотемпературных фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские о-ва): Дис. ... к-та геол.-мин. наук. М: ИГЕМ РАН, 2009.
- Чаплыгин И.В.* Рудная минерализация высокотемпературных фумарол вулкана Кудрявый (Курилы) // Металлогения древних и современных океанов—2016. Миасс: ИМин УрО РАН, 2016. С. 134–137.
- Шадерман Ф.И., Кременецкий А.А., Волох А.А., Штейнберг Г.С.* Современная парагазовая система вулкана Кудрявый – новый источник редких металлов // Отечественная геология. 1996. № 4. С. 46.
- Шадерман Ф.И., Кременецкий А.А.* Новый сырьевой источник рения и перспективы его промышленного освоения // Разведка и охрана недр. 1996. № 8. С. 17–21.
- Korzinsky M.A., Tkachenko S.I., Shmulovich K.I., Taran Y.A., Steinberg G.S.* Discovery of a pure rhenium mineral at Kudriavy volcano // Nature. 1994. V. 369. № 6475. P. 51–52.
- Taran Yu.A., Hedenquist J.W., Korzhinskiy M.A., Tkachenko S.I., Shmulovich K.I.* Geochemistry of magmatic gases from Kudryavy volcano, Iturup, Kuril Islands // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. № 9. P. 1749–1761.
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Chaplygin I.V., Chugaev A.V., Dikov Y.P., Tessalina S.* Behavior of highly-siderophile elements during magma degassing: a case study at the Kudryavy volcano // Chem. Geol. 2008. V. 248. № 3–4. P. 318–341.