

© Авторы, 2026 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2026.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.21+550.4+552.13

<https://doi.org/10.30730/gtr.2026.10.3.265-288>
<https://www.elibrary.ru/slbktr>

Серная лава вулкана Головнина 1979 г. (остров Кунашир, Южные Курильские острова)

А. И. Малышев, Л. К. Малышева

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Резюме. В августе 1979 г. на вулкане Головнина произошли три эпизода излияний серных лав. Активные потоки серы наблюдаются крайне редко, поэтому их изучение остается актуальным. Недостатком наблюдения серных лав в 1979 г. до сих пор было отсутствие описания их вещественного состава. Мы обнаружили остатки серного лавового потока в сентябре 2024 г. на месте, соответствующем излиянию 26 августа 1979 г. В работе описывается структура и вещественный состав лавы, анализируются условия образования серного расплава и его эволюция. В составе лавы обнаружен ранее неизвестный природный гексасульфид мышьяка (AsS_6), доминирующий среди микровключений и являющийся результатом самоочищения мышьяковистой серы при ее кристаллизации. Полученные в работе результаты сравниваются с имеющимися сведениями об излиянии серной лавы на вулкане Ластаррия (северное Чили) в 2019 г. Исследования показывают, что изучение вещества серных лав имеет большое значение для понимания геохимической эволюции литосферы в эпитермальном ($T < 400^\circ\text{C}$) диапазоне температур и не менее важно, чем исследования магматических пород для более высокотемпературных условий.

Ключевые слова: вулкан Головнина, серная лава, самородная сера, конденсация, эпитермальное породообразование, гексасульфид мышьяка, вулкан Ластаррия

Sulfur lava from Golovnin volcano in 1979 (Kunashir Island, Southern Kuril Islands)

Aleksandr I. Malyshev, Lidiia K. Malysheva

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Three episodes of sulfur lava effusion occurred at Golovnin volcano in August 1979. Active sulfur flows are extremely rare, and their study therefore remains relevant. The limitation of observations of sulfur lavas in 1979 has so far been the lack of a description of their material composition. We discovered the remnants of a sulfur lava flow in September 2024 at a site corresponding to the effusion on August 26, 1979. This paper describes the structure and material composition of lava and analyzes the conditions of formation of sulfur melt and its subsequent evolution. A previously unknown natural arsenic hexasulfide, Lastarria volcano (AsS_6) was found in the lava, which dominates among the microinclusions and is the result of self-purification of arsenic sulfur during its crystallization. The results obtained in this work were compared with the available data on the effusion of sulfur lava at Lastarria volcano (northern Chile) in 2019. Studies show that the investigation of the material composition of sulfur lavas is of great importance for understanding the geochemical evolution of the lithosphere in the epithermal ($T < 400^\circ\text{C}$) temperature range and is no less important than the study of igneous rocks for higher temperature conditions.

Keywords: Golovnin volcano, sulfur lava, native sulfur, condensation, epithermal rock formation, arsenic hexasulfide, Lastarria volcano

Финансирование и благодарности

Исследования проведены в рамках государственного задания Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН (№ 124020400013-1) с использованием совместного исследовательского центра «Геоаналитик» ИГТ УрО РАН.

Авторы выражают благодарность Н.С. Чебыкину, Л.В. Леоновой за помощь в работе со сканирующим электронным микроскопом; В.И. Силаеву за консультации по минералогии; администрации и сотрудникам Курильского заповедника за помощь в проведении исследований.

Funding and Acknowledgements

The studies are carried out as a part of the IGG UB RAS state assignment (No. 124020400013-1) using the “Geo-analitik” shared research facility of the IGG UB RAS.

The authors express their gratitude to N.S. Chebykin and L.V. Leonova for their assistance in working with a scanning electron microscope; to V.I. Silaev for his advice on mineralogy and to the administration and staff of the Kuril Reserve for their help in conducting research.

Для цитирования: Малышев А.И., Малышева Л.К. Серная лава вулкана Головнина 1979 г. (остров Кунашир, Южные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2026, т. 10, № 3, с. 265–288. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.265-288>; <https://www.elibrary.ru/slbktr>

For citation: Malyshev A.I., Malysheva L.K. Sulfur lava from Golovnin volcano in 1979 (Kunashir Island, Southern Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2026, vol. 10, No. 3, p. 265–288. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2026.10.3.265-288>; <https://www.elibrary.ru/slbktr>

Введение

В августе 1979 г. на вулкане Головнина (рис. 1) произошли три эпизода излияний серных лав [1]. Последнее из них наблюдали студенты Ташкентского университета Е.П. Трофимов, Е.Б. Глущенко и Т.В. Коржаева. Какие бы то ни было сведения о вещественном составе этих лав отсутствуют. В сентябре 2024 г. в размывах временными водотоками пляжа на южном побережье озера Горячего нами обнаружены остатки серного лавового потока, соответствующие месту последнего излияния серной лавы 26 августа 1979 г. (рис. 1 d–e). Это позволяет изучить структуры и состав лавы.

Первое описание излияния серной лавы принадлежит Т. Ватанабэ [2]. В 1936 г. он наблюдал серный поток длиной 1400 м на вулкане Сиретоко-Иозан, Япония. Описания излияний серных лав содержатся в работах [3–13]. Представленный в обзоре [14] перечень из 55 вулканов [14, табл. 2], на которых наблюдались проявления серного вулканизма, может быть дополнен вулканом Менделеева (о. Кунашир, Россия) и вулканом Берутарубе (о. Итуруп, Россия), на которых Р.Е. Остроумовым, Н.И. Массеровым и Г.М. Власовым [15] наблюдались небольшие многократно изливающиеся потоки серы. Помимо этого, недавно появились новые детальные наблюдения [16] излияний серных лав на вулкане Ластаррия (север Чили) в январе 2019 г.

Образование расплавленной серы исследователи обычно связывают с плавлением и ремобилизацией фумарольных отложений. Появление расплавленной серы рассматривается [14, 16] как свидетельство физико-химических возмущений внутри вулканической системы, являющееся возможным предвестником эруптивной активности вулкана. Активные потоки серы наблюдаются крайне редко [2, 13, 16]. Поэтому опубликованные Е.К. Мархининым [1] наблюдения студентов Ташкентского университета по-прежнему актуальны, однако их существенным недостатком до сих пор было отсутствие описания вещественного состава серных лав. Этот недостаток мы постараемся восполнить в данной работе. Более того, в рамках данного сообщения мы постараемся показать, что изучение вещества серных лав имеет такое же большое значение для понимания эпитепимального ($T < 400$ °C) породо- и рудообразования, как и исследования магматических пород для более высокотемпературных условий.

Методы

Микроструктуру серной лавы исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA LANS с приставками EMF и DORE INCA Energy350X-Max50 и NordlysNano (Oxford Instruments). Состав

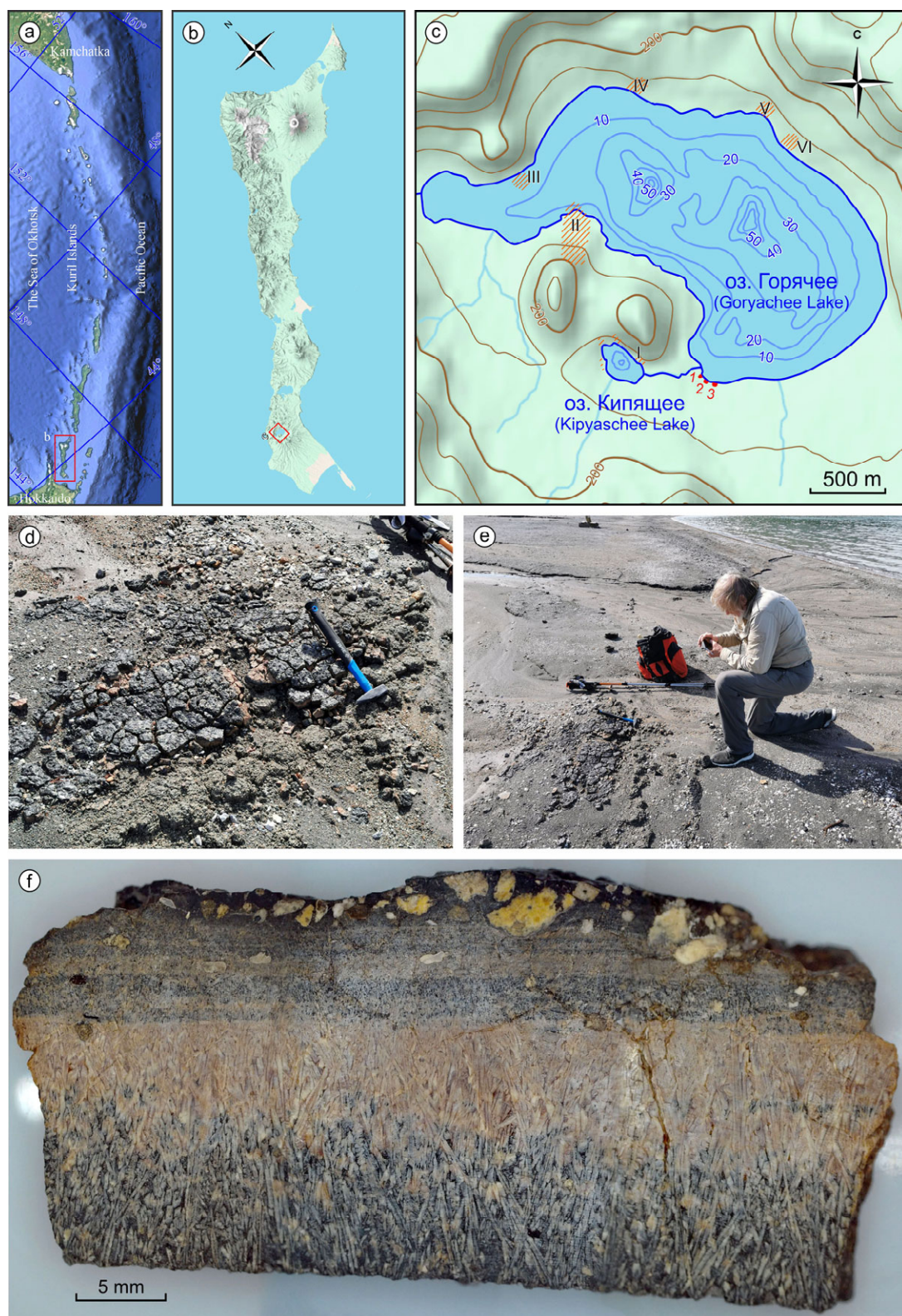


Рис. 1. Курильские острова (a), остров Кунашир (b), кальдера Головнина и точки излияния серной лавы (c) в 1979 г., остатки серного потока (d–e) в его современном состоянии (фото – сентябрь 2024 г.) и поперечное сечение серной лавы (f). 1–3 – точки серных излияний в начале августа (1), в ночь с 18 на 19 (2) и днем 26 (3) августа 1979 г.; I–VI термальные поля: Центральное Восточное (I), Центральное Западное (II), Подводное (III), Безымянное (IV), Набоковское (V) и Черепახовое (VI).

Fig. 1. Kuril Islands (a), Kunashir Island (b), Golovnin caldera, and sulfur lava effusion points (c) in 1979; remnants of the sulfur flow (d–e) in its current state (photo from September 2024) and a cross-section of sulfur lava (f). 1–3 – points of sulfur effusions in early August (1), on the night of August 18–19 (2), and in the afternoon of August 26 (3), 1979; I–VI, thermal fields: Central East (I), Central West (II), Podvodnoe (III), Bezymiannoe (IV), Nabokovskoe (V), and Cherepakhovoe (VI).

лавы определяли при помощи спектрального сканирования. Изучение спектров при помощи сканирующего электронного микроскопа имеет ограничения для количественного определения легких элементов с низким числом электронов в электронной оболочке (элементы I–II периодов). В связи с этим, в частности, в составе вещества не определяется водород. Углерод используется для проводящей зоны на поверхности образца, при расчете спектральных составов он не учитывается. Низка точность количественных определений кислорода, в расчетах его содержания предусмотрена возможность использования стехиометрии. Спектральное разрешение обычно ниже разрешения электронного изображения. Поэтому определение спектра мелких деталей изображения приводит к погрешности, связанной с частичным захватом спектра окружающих веществ. Максимальное разрешение спектра на используемой аппаратуре соответствует кругу диаметром около 6 микрон. Несмотря на эти ограничения, метод оптимален для изучения состава и микроструктуры образцов с целью геохимических реконструкций их генезиса. В теоретической части обсуждения результатов используется молекулярно-химическое моделирование, подробно рассмотренное в [17].

Вулканологическая обстановка

Вулкан Головнина (48.87 N, 145.50 E, 547 м, самый южный вулканический центр Курильской островной дуги) представляет собой кальдеру, которая возникла ~38 тыс. лет назад [18] и имеет диаметр около 6 км. В посткальдерный период образовались 5 андезит-дацитовых куполов [19] – 4 внутри и 1 снаружи кальдеры. В кальдере расположены два вулканических озера (рис. 1 с) [20–22].

Кипящее озеро (135 м н.у.м., площадь 0.05 км²) расположено у южного подножия Центрального Восточного купола и занимает часть кратера, образовавшегося в результате последнего сильного извержения вулкана.

Средняя температура воды на поверхности озера составляет 35–37 °С. Вода Кипящего озера стекает в озеро Горячее по ручью длиной около 400 м. Общий сток из озера в основном обеспечивается горячими источниками, бьющими со дна озера [23, 24]. Максимальная глубина озера составляет 25 м [24]. Дно озера имеет форму кратерной воронки с крутосклонной центральной частью и пологим мелководным обрамлением. Есть свидетельства существования расплава серы на его дне [17, 25].

Горячее озеро (128 м н.у.м., площадь 2,94 км²) расположено в северо-восточной части кальдеры. Температура поверхностного слоя воды в озере в сентябре составляет 17–18 °С. Средняя глубина озера 20 м. В западной и восточной частях озера находятся два подводных кратера глубиной около 60 м. Эхолотное профилирование [26] показало, что оба кратера проявляют газо-гидротермальную активность. Река Озерная вытекает из озера на западе и через 2 км впадает в Охотское море.

Последнее сильное извержение, образовавшее воронку озера Кипящего, произошло около 1300–1420 гг. нашей эры [27] у южного подножия Центрального Восточного купола. Вулкан время от времени демонстрирует эпитермальную эффузивную активность: в августе 1979 г. произошли рассматриваемые в данном сообщении излияния серных лав [1], в сентябре 2022 г. были обнаружены серно-опаловый поток и излияние геля кремниевой кислоты [25]. Есть косвенные свидетельства выбросов газа: летом 1980 г. лес погиб полосой шириной более 100 м, протянувшейся на несколько километров от побережья оз. Горячее на юго-запад [1].

В последнее десятилетие отмечается [24, 28]* тенденция к нарастанию газо-гидротермальной активности вулкана. В частности, с 2024 г. в составе гидротермальной пены Кипящего озера после многих лет отсутствия вновь появились крупные пустотелые шарики самородной серы [28]. Это свидетельствует об изменении температуры донного серного расплава в сторону повышения его полимер-

* Малышев А.И., Малышева Л.К. 2026. Газо-гидротермальная активность вулкана Головнина в 2021–2025 гг. *Вулканология и сейсмология* (принята к печати).

ности. Пик полимерности серы приходится на температуру 187 °С, тогда как температура конденсации воды на дне кратерной воронки оз. Кипящее и контактирующего с ней серного расплава составляет 138.5 °С [17]. Следовательно, происходит повышение температуры донного серного расплава под воздействием глубинной газовой активности.

В 2025 г. пустотелые шарики серы существенно потемнели [28] из-за загрязнения серы веществом из глубинных газовых потоков. Потемнение серы обусловлено рассеянным мышьяком в ее составе, количество которого за год увеличилось с 1.87 до 3.45 вес. %, т.е. в 1.8 раза. Почти в 3 раза (с 0.42 до 1.21 вес. %) увеличилось количество кремния в виде опаловых включений, в 2.5 раза (с 0.54 до 1.34 вес. %) железа, почти в 4 раза (с 0.08 до 0.31 вес. %) цинка в виде сульфидов и в 1.6 раза (с 0.13 до 0.21 вес. %) алюминия в составе глинистых минералов. В целом чистота серы снизилась с 97.0 вес. % в 2024 г. до 93.6% в 2025 г. Все это также свидетельствует о росте активности глубинных газов и делает возможными новые излияния серных лав и/или газовые выбросы аналогично событиям 1979–1980 гг.

Поскольку наблюдения активных серных потоков редки, и информация об излияниях серных лав сохраняет актуальность, мы воспроизводим наблюдения студентов Ташкентского университета по [1] с небольшими правками и сокращениями. Первое истечение серы произошло в начале августа 1979 г. на южном берегу Горячего озера в 160–170 м к востоку от устья, вытекающего из Кипящего озера. Жидкая сера залила тонким (до 10 см, в среднем 5 см) участок песчано-пемзового пляжа размером 15 × 15 м. Объем излившейся серы оценивается в 11.25 м³. Второе истечение серы произошло в ночь с 18 на 19 августа 1979 г. у кромки воды Горячего озера в 33 м к востоку от первого. Длина участка, залитого серой, составила 18 м, ширина – 10 м, местами языки серы стекли под воду по дну озера на 1.5–2 м. При средней толщине серного покрова 5 см объем излившейся серы составил около 9 м³.

Третье истечение серы происходило 26 августа 1979 г. на глазах студентов Ташкентского университета Е. П. Трофимова, Е. Б. Глущенко и Т. В. Коржаевой в 51 м к востоку от второго серного покрова. Истечение серы началось в 13:15 местного времени и продолжалось 2 ч 15 мин. На поверхности светлых песчано-пемзовых озерных отложений сначала появились отдельные темные пятна диаметром 2–10 см. Их становилось все больше. Эти темные пятна представляли собой центры просачивания жидкой серы. Просачивающаяся во многих местах жидкая сера образовала сплошной покров длиной 20 м вдоль берега озера, шириной 8 м и несколькими языками стекала в озеро. Объем ее составил 8–10 м³.

Истечение жидкой серы сопровождалось интенсивным выделением со всей ее поверхности сернистого газа. Местами на поверхности серного покрова возникали небольшие воронки, в которых жидкая сера бурлила под действием выделяющихся газов. Застывание серного покрова проходило динамично, благодаря чему на его поверхности образовывались мелкие серные башенки, пирамидки, грибки, а внутри многочисленные газовые полости. Часто поверхность имела гляцевидный характер. На контакте застывшей серы наблюдался 1–2-сантиметровый слой плотносцементированного озерного песка. Наблюдатели и Е.К. Мархинин считают вероятным, что температура жидкой серы была близкой к ее температуре кипения. Об этом, по их мнению, говорит тот факт, что опущенная в жидкую серу палка сразу же воспламенялась, а также то обстоятельство, что по пологому дну кальдерного озера, преодолевая сопротивление холодной воды, тонкие языки серы смогли продвинуться на расстояние до 3 м.

Результаты

Сохранившийся фрагмент серных лав (рис. 1 d) находится на песчано-пемзовом пляже южного берега оз. Горячего в предполагаемом районе серного излияния 26 августа 1979 г. и имеет площадь около 2 м².

Он обнажился после прошедших в конце августа 2024 г. сильных дождей в размыве на краю временного водотока, впадающего в озеро Горячее (рис. 1 е). Лава имеет неровную черную глянецовую поверхность со следами интенсивного газоотделения – порами и многочисленными округлыми впадинами. Серный покров сильно фрагментирован многочисленными (вероятно, контракционными) трещинами, в которых видна коричневая самородная сера.

Толщина покрова серной лавы около 2.5 см, однако местами она возрастает до 5 см из-за повторного натека серной лавы на ранее излитый покров. В вертикальном разрезе лавы выделяются четыре слоя (рис. 1 ф, рис. 2 а). Приповерхностный слой (3–4 мм) имеет черный цвет основной массы, в которой присутствуют многочисленные включения песка белого и желтоватого цвета размером до 2 мм. Ниже, во втором слое толщиной около 5 мм, крупные включения практически исчезают, лава приобретает неявно выраженную в оттенках серого цвета субгоризонтальную слоистость, связанную с колебаниями количества микровключений и примесей в сере. Еще ниже расположен 3-й слой толщиной 8–12 мм – коричневая самородная сера, практически лишенная темноцветных включений. Здесь появляется субвертикальная неоднородность, связанная с формированием кристаллического агрегата игольчатой моноклинной серы. Поскольку моноклинная сера при температуре ниже 95.3 °C переходит в ромбическую, то в настоящее время эта неоднородность представлена псевдоморфозами ромбической серы по моноклинной.

В четвертом, подошвенном, слое толщиной 4–8 мм вновь появляются включения песка размером до 1 мм, а также обильные микровключения, окрашивающие этот слой в черный цвет. Однако в этом слое, в отличие от двух верхних слоев, микровключения концентрируются в межкристаллическом пространстве игольчатой серы, подчеркивая ее субвертикальную ориентировку.

Повторное натекаание серной лавы на ранее излитый покров приводит к более сложной

слоистости. Три верхних слоя нового покрова аналогичны описанной выше слоистости одиночного покрова, тогда как подошвенный слой верхнего покрова объединяется с двумя верхними слоями более раннего нижнего покрова и образует многочисленные локальные проседания сквозь слой коричневой самородной серы нижнего покрова. Подошвенный слой нижнего покрова за счет этого осаждения обогащается дополнительным песчаным материалом из собственных верхних слоев и подошвенного слоя нового покрова. Игольчатая раскристаллизация серной лавы объединенного покрова имеет сквозной характер, распространяясь от подошвы нижнего покрова до верха слоя коричневой серы в перекрывающем натеке.

Фрагменты силикатных минералов редки. В полосе сканирования рис. 2 b обнаружено лишь 4 небольших фрагмента Fe-Mg-Ca силикатов (пироксенов) размером от 110 до 325 мкм. Присутствуют отдельные (3 шт. на полосу сканирования рис. 2 а, b) песчинки вулканической пемзы (рис. 2 j, t) размером около 1 мм. Они выделяются высокой и, как правило, незаполненной пористостью, а также достаточно однородным алюмосиликатным составом вулканического стекла – 70.5 % Si, 15.9 % Al, 5.9 % Na, 3.7 % Ca, 3.2 % Fe, 0.8 % K (здесь и далее в ат. % без учета кислорода). В стекле присутствуют микролиты размером 3–10 мкм. По составу они отличаются от стекла отсутствием Na и K, пониженным содержанием Si (52.8 %) и Al (5.7 %), наличием Mg (20.6 %) и повышенными содержаниями Fe (12.4 %) и Ca (8.5 %).

Аналогичное по составу алюмосиликатное предположительно вулканическое стекло, но без микролитов, присутствует во многих включениях песчанистого материала. Часто оно формирует губчатые формы с порами, полностью заполненными серой (рис. 2 r), вплоть до образования крупных ажурных конструкций размером до 3 мм (рис. 2 s). В состав этих образований наряду с предположительно вулканическим стеклом входят блоки чистого кремнезема (рис. 2 r) и фрагменты Fe-Mg-Ca силикатов (рис. 2 s).

Наиболее сложную структуру имеют песчанистые включения в верхнем слое серного покрова (рис. 2 с, л). Предположительно вулканическое стекло в них постоянно демонстрирует переходы в чистый опал (рис. 2 с), иногда имеющие довольно сложную пространственную форму (рис. 2 л). В заполнении пор помимо самородной серы участвует сульфид мышьяка (рис. 2 х). В одной из заполненных серой пор обнаружено пластинчатое (скелетное) выделение TiO_2 (рис. 2 г).

В песчанистых включениях, не имеющих в своем составе вулканического стекла, доминирует кремнезем (опал) – рис. 2 ф, и, м, п, q. Размеры опаловых включений обычно не превышают 1.5 мм. В них присутствуют более мелкие выделения TiO_2 в виде отдельных зерен (рис. 2 q) или дендритовидных выделений (рис. 2 ф, и), алюмосиликаты с атомарным соотношением $\text{Al/Si} \approx 1$ без примеси щелочных металлов (каолинит – $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$, рис. 2 ф, и, q), а также алюмонатрокалиевые квасцы (рис. 2 м, п). Природная калиевая разность этих квасцов, образующая промышленные скопления, известна как алуни́т – $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$. В дальнейшем для простоты мы будем использовать это название с уточнением при необходимости реальных атомарных соотношений K и Na. В случае алуни́та в опаловом включении на рис. 2 м, п атомарное соотношение $\text{K}/(\text{Na} + \text{K})$ варьирует от 0.19 до 0.42 при среднем значении 0.32.

Среди микровключений вулканическое стекло отсутствует. Доминируют опал, сульфиды железа и мышьяка. В подчиненном количестве встречаются алуни́т (рис. 2 о, u, v), выделения TiO_2 (как самостоятельные – рис. 2 v, так и пластинчато-решетчатые скелетные формы в сере или опале – рис. 2 г, w, y), зерна сульфида цинка (сфалерит ZnS , рис. 2 d, u, w), каолинит (рис. 2 w, y). Изредка встречаются очень мелкие выделения барита (BaSO_4).

Микровключения опала имеют округлую комковатую форму с неровной волнистой поверхностью (признак коагуляции). Сколы или иные признаки дробления отсутствуют. По составу опал обычно представлен чистым SiO_2 ,

но иногда содержит незначительную примесь алюминия (Al/Si до 0.03). Микровключения опала могут содержать выделения титана, каолинита, алуни́та (рис. 2 u, v, w), либо сами могут входить в состав более крупных агрегатов алуни́та (рис. 2 п, o).

В свою очередь, включения алуни́та могут содержать в своем составе каолинит и сульфиды железа (рис. 2 o). Наиболее мелкие включения алуни́та имеют округлую форму (рис. 2 u). Встречается как кристаллический алуни́т (рис. 2 o, p), так и, чаще, бесформенный (ангедральный). Иногда они образуют совместные агрегаты. Соотношение K и Na во включениях алуни́та не влияет на кристалличность или ангедральность, демонстрируя полный спектр от чисто натриевых до чисто калиевых разностей при среднем соотношении $\text{K}/(\text{Na} + \text{K}) \approx 0.4$.

Каолинит ($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$) обычно образует мелкие округлые включения или более сложные их агрегаты в сере, опале или алуни́те.

Выделения диоксида титана присутствуют и в сере (рис. 2 г, v, y; рис. 3 а–с), и в опале (рис. 2 ф, и, q, w; рис. 3 d–f) в виде как бесформенных плотных образований (рис. 2 q, v; рис. 3 а), так и пластинчато-решетчатых агрегатов (рис. 2 г, w, y; рис. 3 b–d). Помимо этого, TiO_2 присутствует в опале в форме дендритовидных выделений (рис. 2 ф, и; рис. 3 e–f).

Изображения с большим увеличением (поле зрения 20–100 мкм) показывают, что реальные пластинчато-решетчатые структуры выделений TiO_2 образуются только в сере (рис. 3 b, c). В опале (рис. 3 d) эти структуры формируются игольчатыми выделениями TiO_2 размером менее 2 мкм. Скопления иголок расположены пунктиром вдоль линий, образующих решетчатую структуру. Но сами иголки ориентированы перпендикулярно этим линиям. В дендритовидных выделениях TiO_2 в опале (рис. 3 e, f) перпендикулярность игольчатых выделений линиям их пространственной концентрации сохраняется, но поскольку сами линии произвольно изогнуты, то создают впечатление дендритовидности.

В плотных выделениях TiO_2 в сере (рис. 3 а) кроме Ti содержится 10.2 ат. % S и

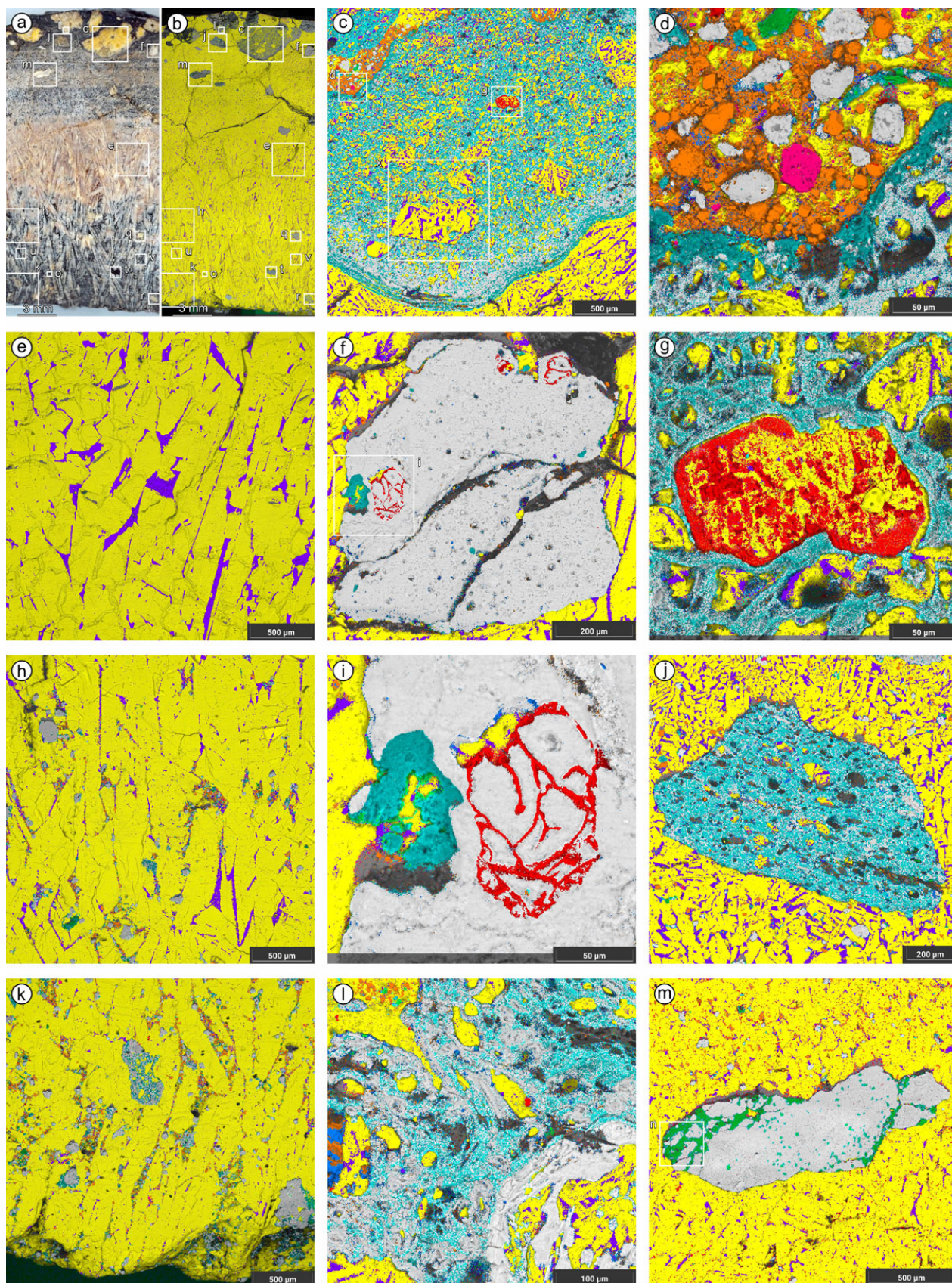


Рис. 2. Структура серной лавы в естественном цвете (а), на BSE-изображениях (р, х) и в условных цветах спектрального картирования (b–o, q–w, y): желтый – самородная сера, светло-серый – SiO_2 (опал), красный – TiO_2 , малиновый – ZnS (сфалерит), голубой – алюмосиликаты, синий – Fe-Mg-Ca силикаты, зеленый – сульфаты, оранжевый – сульфиды железа, фиолетовый – сульфиды мышьяка, от темно-серого до черного – спектральные тени. Пояснения см. в тексте.

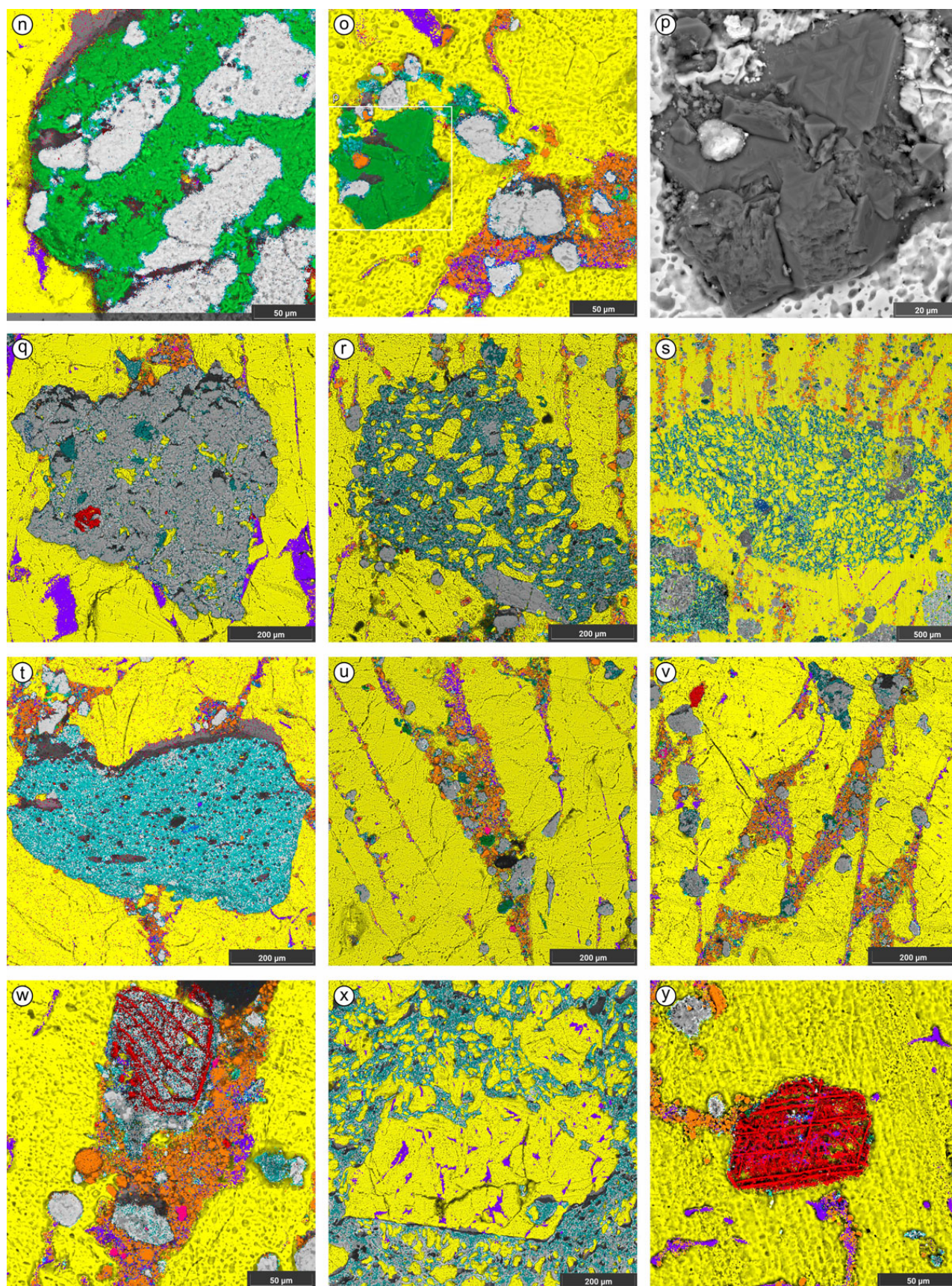


Fig. 2. The structure of sulfur lava in natural color (a), on BSE images (p, x), and in the conventional colors of spectral mapping (b–o, q–w, y): yellow, native sulfur; light gray, SiO_2 (opal); red, TiO_2 ; dark red, ZnS (sphalerite); light blue, aluminosilicates; blue, Fe-Mg-Ca silicates; green, sulfates; orange, iron sulfides; purple, arsenic sulfides; dark gray to black, spectral shadows.

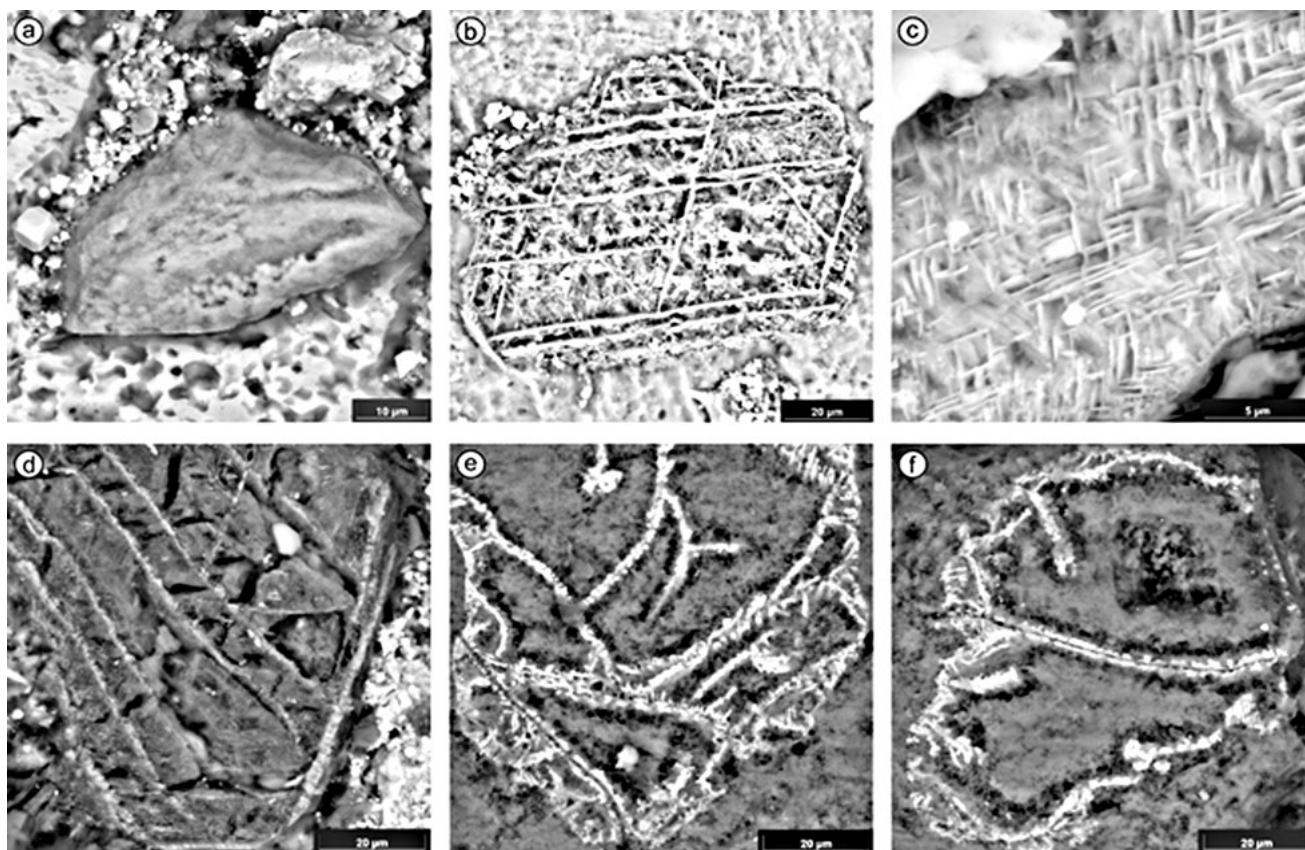


Рис. 3. Микровключения TiO_2 в сере (а), пластинчато-решетчатые агрегаты TiO_2 в сере (b–c) и опале (d), дендритовидные выделения TiO_2 в опале, BSE-изображения. Пояснения см. текст.

Fig. 3. Microinclusions of TiO_2 in sulfur (a), plate-lattice aggregates of TiO_2 in sulfur (b–c) and opal (d), and dendritic secretions of TiO_2 in opal, BSE images.

1.7 % As, т.е. примесь мышьяково-сульфидной фазы AsS_6 (см. описание ниже). Вариации состава в пластинчато-решетчатых выделениях TiO_2 в сере не прослеживаются из-за высокой концентрации пластинок, превышающих разрешение спектральных определений. По спектрам атомарный состав этих выделений без учета кислорода – 39.1 % S, 33.9 % Ti, 17.5 % Fe, 4.2 % Si, 2.8 % Mg, 1.3 % Mn, 0.6 % Al, 0.5 % As. Судя по атомарным соотношениям, сера в данном случае полностью сульфидизирована с образованием дисульфида железа FeS_2 и мышьяково-сульфидной фазы AsS_6 .

В составе дендритовидных выделений TiO_2 в опале (рис. 3 e, f) спектральные определения показывают кроме самого диоксида титана лишь присутствие вмещающего кремнезема с небольшой примесью глинозема ($\text{Al/Si} \sim 0.01\text{--}0.02$). Состав пластинчато-решетчатых выделений TiO_2 в опале более сложен. Расстояние между пластинами решетки в выделении TiO_2 ,

показанном на рис. 3 d, достаточно для оценки вариаций состава на пластинах и между ними. На линиях решетки доминирует Ti – 63.4 ат. % без учета кислорода. Кремний в подчиненном количестве (20.1 % Si). Присутствуют S (11.5 %), Fe (2.0 %), Al (1.6 %) и As (1.4 %). Между пластинами доминирует Si – 42.6 %. Ti в подчиненном количестве (26.4 %), при увеличении в межпластинном пространстве просматриваются рассеянные игольчатые образования, аналогичные выделениям TiO_2 на пластинах. Кроме повышенных содержаний S (18.4 %), Al (5.5 %), Fe (4.0 %) и As (1.8 %) присутствует небольшое количество Mg (1.3 %).

Среди сульфидных включений в лаве преобладают пленочные и трубчатые выделения ранее неизвестного природного гексасульфида мышьяка AsS_6 (рис. 4, рис. 5, табл. 1), располагающиеся в межкристаллическом пространстве моноклинной серы. Это единственные включения, присутствующие в слое коричне-

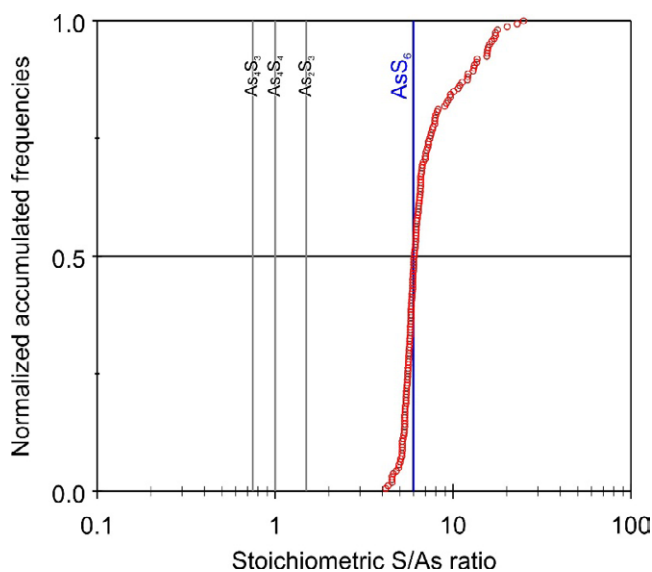


Рис. 4. Кумулята стехиометрического соотношения S/As в гексасульфиде мышьяка AsS_6 серной лавы. As_2S_3 (аурипигмент), As_4S_4 (реальгар), As_4S_3 (диморфит) – известные природные сульфиды мышьяка.

Fig. 4. Cumulative stoichiometric S/As ratio in arsenic hexasulfide AsS_6 of sulfur lava. As_2S_3 (auripigment), As_4S_4 (realgar), and As_4S_3 (dimorphite) are known natural arsenic sulfides.

вой самородной серы (3-й слой). Они отличаются от серы на BSE-изображениях (рис. 5) повышенной яркостью из-за более высокой электронной плотности As.

По данным, приведенным в табл. 1, медианное значение стехиометрического коэффициента $\text{S/As} = 5.988$, по более полной выборке из всех 160 определений (рис. 4) медианное значение $\text{S/As} = 6.072$, что соответствует точке пересечения уровня 0.5 накопленных нормализованных частот с кумулятой на рис. 4. Это показывает соответствие химического состава гексасульфида мышьяка AsS_6 . В то же время отмечается логнормальная асимметрия распределения в сторону высоких содержаний серы относительно медианных значений – среднее стехиометрическое соотношение по всей выборке составляет $\text{S/As} = 7.544$ при высоком среднеквадратическом отклонении $\sigma = 3.693$. По нашему мнению, это искажение распре-

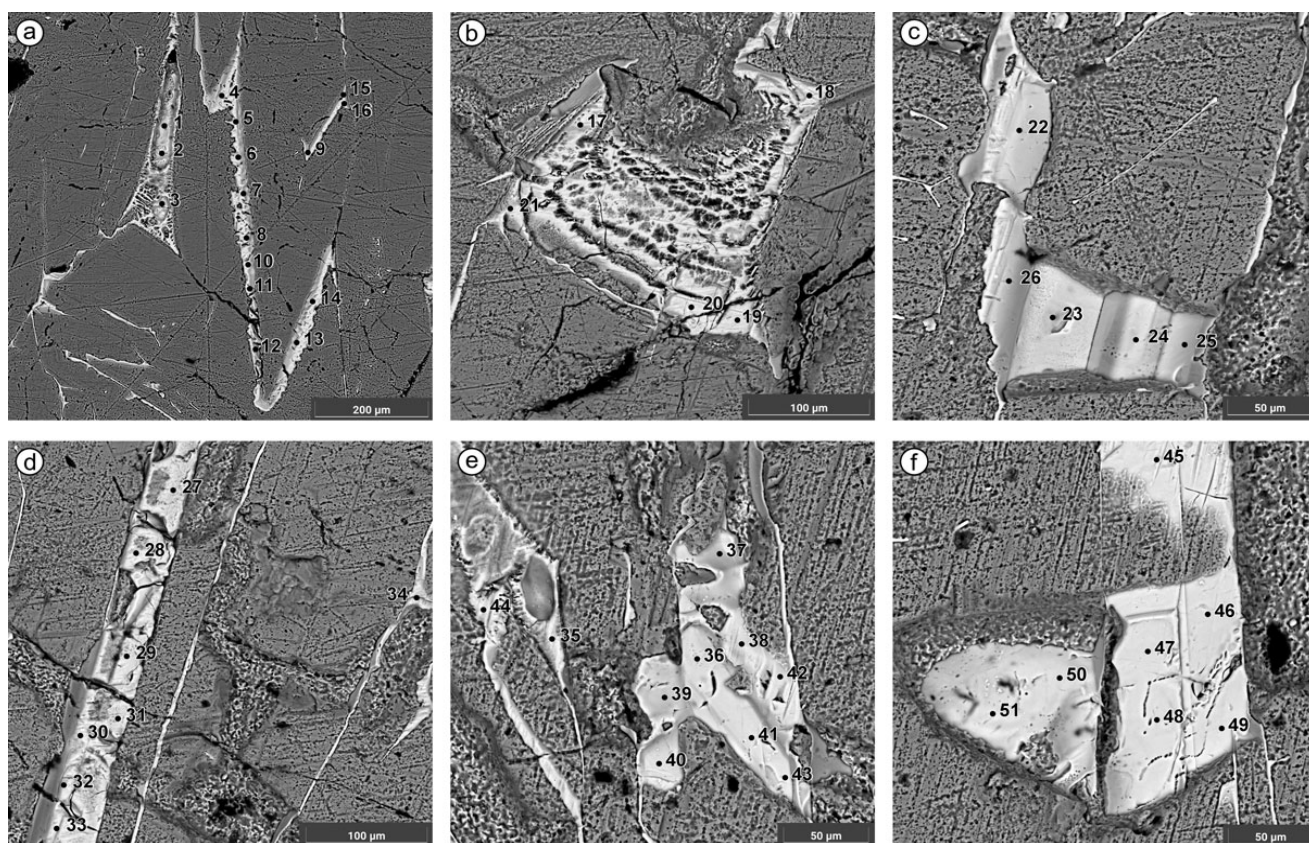


Рис. 5. Светлые пленочные выделения гексасульфида мышьяка в более темной самородной сере на BSE-изображениях: а – участок, соответствующий фрагменту спектральной карты рис. 2 б; б–д – участки, соответствующие фрагментам спектральной карты рис. 2 е. Номера точек опробования соответствуют номерам в табл. 1.

Fig. 5. Light foil precipitates of arsenic hexasulfide in darker native sulfur in BSE images: a, area corresponding to a fragment of the spectral map in Fig. 2 b; b–d, areas corresponding to fragments of the spectral map Fig. 2 e. The numbers of the test points correspond to the numbers in Table 1.

Таблица 1. Стехиометрия гексасульфида мышьяка AsS_6 **Table 1.** Stoichiometry of arsenic hexasulfide AsS_6

№ п.п.	S, ат. %	As, ат. %	Фор- мула	№ п.п.	S, ат. %	As, ат. %	Фор- мула	№ п.п.	S, ат. %	As, ат. %	Фор- мула
1	84.95	15.05	$\text{AsS}_{5.64}$	18	84.66	15.34	$\text{AsS}_{5.52}$	35	83.19	16.81	$\text{AsS}_{4.95}$
2	86.00	14.00	$\text{AsS}_{6.14}$	19	85.89	14.11	$\text{AsS}_{6.09}$	36	84.34	15.66	$\text{AsS}_{5.39}$
3	87.08	12.92	$\text{AsS}_{6.74}$	20	85.06	14.94	$\text{AsS}_{5.69}$	37	86.05	13.95	$\text{AsS}_{6.17}$
4	85.69	14.31	$\text{AsS}_{5.99}$	21	85.13	14.87	$\text{AsS}_{5.72}$	38	90.17	9.83	$\text{AsS}_{9.17}$
5	85.23	14.77	$\text{AsS}_{5.77}$	22	87.20	12.80	$\text{AsS}_{6.81}$	39	94.05	5.95	$\text{AsS}_{15.81}$
6	85.73	14.27	$\text{AsS}_{6.01}$	23	84.51	15.49	$\text{AsS}_{5.46}$	40	93.99	6.01	$\text{AsS}_{15.64}$
7	85.61	14.39	$\text{AsS}_{5.95}$	24	92.36	7.64	$\text{AsS}_{12.09}$	41	85.33	14.67	$\text{AsS}_{5.82}$
8	86.17	13.83	$\text{AsS}_{6.23}$	25	86.60	13.40	$\text{AsS}_{6.46}$	42	87.92	12.08	$\text{AsS}_{7.28}$
9	84.90	15.10	$\text{AsS}_{5.62}$	26	86.04	13.96	$\text{AsS}_{6.16}$	43	85.62	14.38	$\text{AsS}_{5.95}$
10	86.10	13.90	$\text{AsS}_{6.19}$	27	84.74	15.26	$\text{AsS}_{5.55}$	44	83.52	16.48	$\text{AsS}_{5.07}$
11	85.22	14.78	$\text{AsS}_{5.77}$	28	84.40	15.60	$\text{AsS}_{5.41}$	45	85.86	14.14	$\text{AsS}_{6.07}$
12	86.93	13.07	$\text{AsS}_{6.65}$	29	84.25	15.75	$\text{AsS}_{5.35}$	46	88.47	11.53	$\text{AsS}_{7.67}$
13	86.20	13.80	$\text{AsS}_{6.25}$	30	84.56	15.44	$\text{AsS}_{5.48}$	47	83.81	16.19	$\text{AsS}_{5.18}$
14	85.76	14.24	$\text{AsS}_{6.02}$	31	83.27	16.73	$\text{AsS}_{4.98}$	48	84.27	15.73	$\text{AsS}_{5.36}$
15	85.31	14.69	$\text{AsS}_{5.81}$	32	83.97	16.03	$\text{AsS}_{5.24}$	49	86.83	13.17	$\text{AsS}_{6.59}$
16	85.76	14.24	$\text{AsS}_{6.02}$	33	83.88	16.12	$\text{AsS}_{5.20}$	50	91.63	8.37	$\text{AsS}_{10.95}$
17	85.24	14.76	$\text{AsS}_{5.78}$	34	88.33	11.67	$\text{AsS}_{7.57}$	51	88.89	11.11	$\text{AsS}_{8.00}$

Примечание: Нумерация соответствует точкам опробования, показанным на рис. 5.

Note: The numbering corresponds to the sampling points shown in Fig. 5.

деления обусловлено тонкостью пленок AsS_6 , имеющих в некоторых случаях (см., например, поперечное сечение пленки в центральной части рис. 5 с) толщину 1–2 мкм. Подобные пленки тоньше, чем глубина проникновения электронного пучка при спектральном анализе (2–4 мкм), что приводит к добавлению в спектр избыточной серы из подпленочного слоя вмещающей серы. Для отбраковки этих некорректных определений расчет среднего значения и его среднеквадратического отклонения выполнен для определений в диапазоне $\pm \sigma$ ($S/\text{As} = 7.544 \pm 3.693$). Первая итерация дает новое соотношение $S/\text{As} = 6.233 \pm 1.204$. Вторая итерация по значениям в пределах уже нового диапазона полностью устраняет асимметрию распределения за счет тонких пленок и приводит к итоговой формуле для гексасульфида мышьяка $\text{AsS}_{5.96 \pm 0.54}$.

FeS_2 сопоставим по распространенности с AsS_6 , но присутствует (и доминирует среди

других включений) в темноцветных слоях серной лавы (рис. 6). Обычны кристаллические формы FeS_2 размером 2–10 мкм (рис. 6 h). Иногда они объединяются в сравнительно крупные агрегаты (рис. 6 e). В сколах как кристаллов, так и агрегатов просматриваются многочисленные поры и каналы, являющиеся признаками скелетного роста. Среди выделений FeS_2 размером менее 2 мкм обычны сферические образования (рис. 6 c, f, i). Встречаются более крупные и сложные сферические агрегаты FeS_2 – фрамбоиды: на рис. 6 j представлен фрамбоид диаметром ~20 мкм, состоящий из большого количества примерно одинаковых мелких (~1.3 мкм) хорошо ограненных кристаллов пирита; на рис. 6 k – фрамбоид размером ~10 мкм, образованный из более мелких (~0.8 мкм) кристаллов. Корреляция диаметра фрамбоидов с размером слагающих их кристаллитов обычна для подобных структур [29]. Пример еще одной разновидности сложных

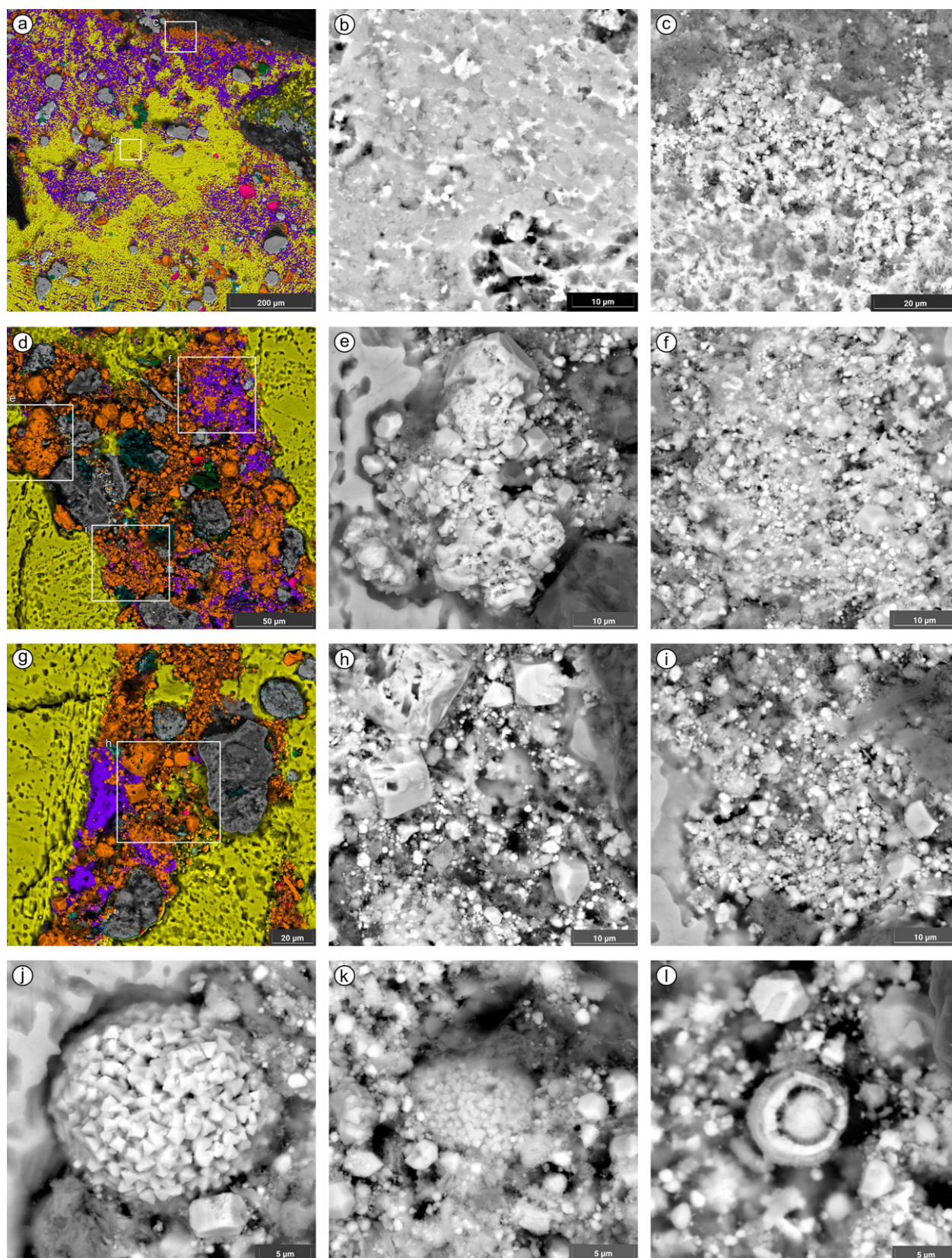


Рис. 6. Агрегаты микровключений в приповерхностной зоне закалки (а–с) и подошвенном (d–i) слое лавы, а также фрамбоидальные (j, k) и сферический (l, в центре) агрегаты FeS_2 . Условные цвета спектральных карт а, d, g – см. рис. 2. Пояснения см. текст.

Fig. 6. Microinclusion aggregates in the near-surface quench zone (a–c) and the basal layer (d–i) of the lava, as well as framboidal (j, k) and spherical (l, in the center) FeS_2 aggregates. The color scheme used in spectral maps a, d, g is shown in Fig. 2.

сферических агрегатов FeS_2 представлен на рис. 6 l. Это шарик диаметром около 8.5 мкм. Скол на его передней стороне показывает его сложное внутреннее строение: внешняя оболочка толщиной 0.5–1.2 мкм отделена от внутреннего ядра (эллипсоидального в видимой части с размером 3.9×3.3 мкм) слоем пустоты (0.5–0.8 мкм), пронизанной связующей паутиной нанометровых сульфидных нитей.

Кроме сульфидов мышьяка и железа в серной лаве обычен, но имеет второстепенное значение сульфид цинка (сфалерит, ZnS). Он входит в состав сульфидных скоплений вместе с сульфидами железа в виде сферических выделений размером до 30 мкм (рис. 2 d).

Распределение микровключений в вертикальном сечении серной лавы неравномерно и связано как со слоистостью лавы, так и с раскристаллизованностью и чистотой вмещающей серы. Межкристаллическое пространство игольчатой серы в подошвенном (4-м) слое лавы заполнено микровключениями опала, алуниита и мультисульфидной смесью (рис. 2 k, u, v, w; рис. 6 d, g). Среди сульфидов здесь доминирует FeS_2 . AsS_6 входит в эту смесь либо в виде отдельных небольших пластинок (рис. 6 g), либо в рассеянном виде, образуя локальные концентрации. Присутствие в мультисульфидных скоплениях сульфида мышьяка в виде AsS_6 подтверждается площадными спектральными анализами этих скоплений. Результаты анализов показывают, что общее атомарное стехиометрическое соотношение $(2\text{Fe} + \text{Zn} + 6\text{As})/\text{S}$ для сульфидных скоплений близко к 1. Эти результаты также свидетельствуют об отсутствии в составе скоплений свободной серы. Основу скоплений формирует неструктурированная (колломорфная) суль-

фидная матрица (рис. 6 f, h–i), на фоне которой выделяются отдельные более яркие центры сульфидной кристаллизации.

Переход от подошвенного черного лавового слоя к расположенному выше слою коричневой серы происходит постепенно (рис. 1 f). И так же постепенно (рис. 2 e, h, k) происходит изменение состава микровключений в межкристаллическом пространстве игольчатой серы – увеличение количества и величины пластинок AsS_6 с соответствующим уменьшением доли всех остальных микровключений. При этом вмещающая сульфидные включения игольчатая сера демонстрирует идеальный спектр чистой серы. Ее субвертикальные игольчатые кристаллы нередко имеют сквозное распространение через оба слоя.

В расположенном еще выше слое с неявно выраженной субгоризонтальной слоистостью игольчатые кристаллы исчезают. Участки чистой серы более мелкие и хаотичные (рис. 2 j, m), однако примеси в сере по-прежнему отсутствуют. В сульфидных скоплениях более светлых слоев доминирует AsS_6 , в более темных – FeS_2 .

В приповерхностном слое сульфидные включения также группируются в межкристаллическом пространстве серы, однако сама сера практически постоянно содержит примеси. Наиболее ярко это проявляется в самой верхней части слоя – зоне закалки (рис. 6 a–c). Здесь даже самые чистые участки серы (рис. 6 b) имеют стехиометрическое соотношение $(2\text{Fe} + \text{Zn} + 6\text{As})/\text{S} \approx 0.1$, т.е. содержат лишь 90% свободной серы, тогда как оставшиеся 10% серы входят в состав сульфидов. Очень мелкие (с нанометровой размерностью в поперечнике) хаотично расположенные ленточные и сфери-

Таблица 2. Макроэлементный состав серной лавы

Table 2. Macro element composition of sulfur lava

	Na	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Zn	As	Сумма
at. %	0.15	0.59	3.94	93.28	0.06	0.08	0.16	0.89	0.04	0.82	100.00
wt. %	0.11	0.49	3.44	92.08	0.07	0.09	0.24	1.52	0.08	1.89	100.00

Примечание: без учета кислорода.

Note: excluding oxygen.

ческие сульфидные образования хорошо выделяются на BSE-изображениях более светлыми оттенками (рис. 6 б). На менее чистых участках (рис. 6 с, слева внизу) сульфидизированность серы достигает 50%, тогда как в сульфидных скоплениях (рис. 6 с, центр) стехиометрическое соотношение $(2\text{Fe} + \text{Zn} + 6\text{As})/\text{S} \approx 1$, т.е. свободная сера полностью отсутствует.

Состав серной лавы по данным площадного спектрального анализа в полосе рис. 2 а–б приведен в табл. 2. Общее соотношение $\text{As}/(\text{As}+\text{S})$ составляет 0.87 ат. % или 2.01 вес. %.

Обсуждение и выводы

Температура серных излияний

Мнение [1] о том, что температура серной лавы во время излияния близка к температуре кипения серы (444.6 °C), представляется субъективным и завышенным. Температура плавления ромбической α -серы 112.8 °C, моноклинной β -серы – 119.3 °C. При температуре 187 °C сера достигает пика полимеризации и практически теряет подвижность. Дальнейшее повышение температуры приводит к постепенному разрыву полимерных цепочек и снижению вязкости серы. Однако температура самовоспламенения паров серы составляет 190 °C*, а собственная температура горения серного расплава на воздухе – 280–360 °C. Именно пик полимеризации серы при 187 °C, лишаящий ее подвижности, делает излияние серных лав на земной поверхности экзотическим явлением. В противном случае серные потоки, сжигая все на своем пути и превращая атмосферный кислород в диоксид серы, могли бы быть более страшным экологическим бедствием по сравнению с силикатными лавами.

В экспериментальных исследованиях и наблюдениях за природными серными лавами установлено [16], что низкотемпературный расплав серы достигает минимальной вязкости при ~159 °C, а затем вязкость увеличивается на

четыре порядка при 160 °C. Температура природной расплавленной серной лавы на вулкане Ластаррия (север Чили) в январе 2019 г. составляла 124–158 °C. Этот температурный диапазон представляется вероятным и для серных лав вулкана Головнина. Упомянутый наблюдателями факт воспламенения опущенной в жидкую серу палки, скорее всего, свидетельствует об образовании и самовоспламенении** сероуглерода CS_2 при контакте древесины с серным расплавом.

Структура серной лавы

Наличие сравнительно крупных игольчатых кристаллов моноклинной серы в двух нижних слоях серной лавы и их субвертикальная ориентация свидетельствуют об их образовании при раскристаллизации внутренней части уже остановившегося серного потока. Разделение этой части лавы на верхний слой относительно чистой коричневой серы и темный подошвенный слой, обогащенный песчанистыми включениями и сульфидами железа, произошло под воздействием гравитационной дифференциации. Кристаллизация серы сопровождалась вытеснением из ее состава механических и химических примесей в межкристаллическое пространство. Представляется вероятным, что образующийся в этих условиях гексасульфид мышьяка не является самостоятельным природным образованием. Он является следствием раскристаллизации мышьяковистой серы и представляет собой вещество, молекулярная структура которого устойчива к самоочищению кристаллизующейся серы.

Расположенный над коричневой серой слой с неявно выраженной в оттенках серого цвета субгоризонтальной слоистостью (признаком ламинарного течения) сформировался еще до полной остановки потока. Большая вязкость (вследствие более быстрого остывания) этой части потока по сравнению с его ядром ограничила гравитационную дифференциацию и способствовала уменьшению размера как

* ГОСТ 12.1.041

** Температура самовоспламенения сероуглерода 102 °C (ГОСТ 19213–73)

фрагментов чистой кристаллической серы, так и разделяющих их концентраций включений. Скопление песчанистых включений в приповерхностном слое лавы обусловлено, вероятно, газлифтингом – выносом их в приповерхностный слой выделяющимися газами. Микровключения также выносились газовым потоком и накапливались на песчанистых включениях (рис. 2 с, d) или в поверхностной корочке закаливания (рис. 6 а–с). Сама сера в поверхностной корочке из-за быстрого остывания минимально раскристаллизована и насыщена включениями нанометровой размерности.

Минеральный состав лавы

Результирующий минеральный состав окончательно сформирован на месте излияния лавы под воздействием неравномерного остывания, активного газоотделения, гравитационной дифференциации и самоочищения серы при ее кристаллизации. Гравитационная дифференциация и газоотделение обеспечивают встречное субвертикальное перераспределение вещества лавы. Роль гравитационной дифференциации очевидна в формировании подошвенного слоя, обогащенного тяжелыми сульфидами и песчанистыми включениями.

Дегазация лавы помимо газлифтинга песчанистых включений влияет на состав этих включений. В частности, мелкие включения кремнезема, находившиеся в момент излияния в форме коллоида, могли объединяться с песчанистыми включениями, существенно меняя их состав, структуру и морфологию (рис. 2 l). Возможен также прямой перенос химических соединений газовым потоком. Присутствие пластинчато-решетчатого вкрапленника TiO_2 в сере (рис. 2 с, g), заполняющей пору песчанистого вкрапленника, свидетельствует в пользу его формирования на месте обнаружения (аутигенности), вероятно, под воздействием переноса TiO_2 газами.

Самоочищение серы при ее раскристаллизации вытесняет в межкристаллическое пространство как микровключения, так и загрязняющие примеси. Это способствует образованию в межкристаллическом пространстве

не только агрегатов микровключений, но и сульфидного коллоидного субстрата, на основе которого происходит рост (в том числе скелетный) существующих сульфидных кристаллов и агрегатов и образование новых центров кристаллизации.

Многие минералы в составе лавы имеют признаки совместного образования (сингенетичности). Прежде всего это относится к кристаллической самородной сере и гексасульфиду мышьяка. Присутствуют многочисленные признаки сингенетичности выделений TiO_2 в сере и опале, а также свидетельства совместного образования опала и алунита. Причины этой сингенетичности обусловлены условиями образования первичной серной “магмы” и ее составом.

Источник и условия формирования серной магмы

Ближайшая область возможной генерации серной магмы – Центральное Восточное термальное поле (рис. 1 с, I), к которому относится вся донная часть озера Кипящего и ряд участков на его побережье. Более того, локация излияний серы в августе 1979 г. трассируют линию от ближайшего к излияниям юго-восточного участка, удаляясь от него в каждом эпизоде. Вещественный состав серной лавы близок к составу донного расплава озера Кипящего [17, 25]. Все это позволяет рассматривать юго-восточный участок Центрального Восточного термального поля как наиболее вероятный участок для генерации серного расплава в излияниях 1979 г.

Магмы среднекислотного состава, характерные для последних извержений вулкана Головнина, способны генерировать потоки флюида с соотношением $\text{S}/\text{H}_2\text{O}$ до 0.03 [17, 25], что в приповерхностных условиях примерно соответствует изолинии парциального давления насыщения паров серы $x_s = 0.25\%$ (рис. 7 а). Существование серного расплава в контакте с водой на дне озера возможно, начиная с глубин ~5 м (рис. 7 а, точка 1) [30]. Как было показано ранее [17, 25], серный расплав образуется в донных кратерных воронках в озерах кальдеры

Головнина в результате охлаждающего воздействия озерных вод на высокотемпературные флюидные потоки. Давление водного столба определяет парциальное давление насыщенных паров серы в условиях начала конденсации воды: $x_{s(2)} = 3.90 \cdot 10^{-3} \%$ в гидротермальных выходах на глубине 25 м при температуре 138.5 °C в кратерной воронке Кипящего озера (рис. 7 а, точка 2), $x_{s(3)} = 9.28 \cdot 10^{-3} \%$ при температуре 165 °C на глубине 62 м в кратерных воронках Горячего озера (рис. 7 а, точка 3). Под охлаждающим воздействием озерной воды в донный расплав серы в озерах Кипящее и Горячее переходит соответственно 98.5 и 96 % от исходного потенциала серы во флюидных потоках.

Образование серного расплава под охлаждающим воздействием конденсата воды оказывает влияние на состав минеральных примесей к серному расплаву. Кислотная волна*, возникающая в условиях конденсации воды в присутствии кислых газов, имеет определяющее значение для формирования минеральных примесей. Она оказывает разрушающее воздействие на силикаты, титанаты, ферраты, ферриты, цинкаты и другие соли щелочных металлов, транспортируемые газовым потоком в щелочном конденсате.

Выводы о породо- и рудообразовании в зоне донного расплава получены на основе изучения частиц вещества, выносимого в составе гидротермальной (каолининовой) пены со

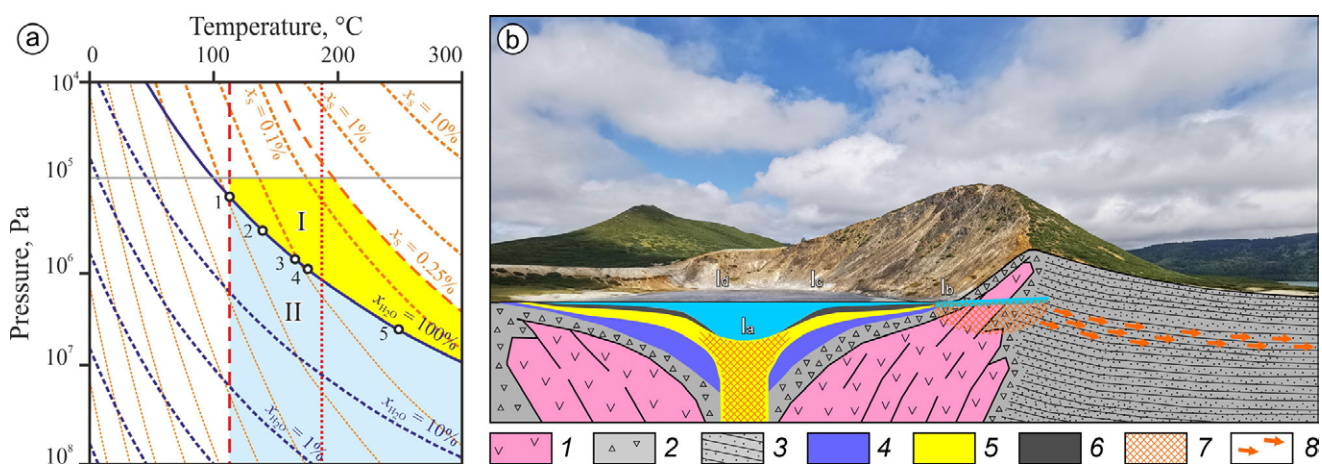


Рис. 7. Образование серного расплава для излияний 1979 г.

а – TP -диаграмма конденсации серы и воды. Температуры плавления–затвердевания серы и максимальной вязкости серного расплава показаны вертикальными красными пунктирной и точечной линиями, соответственно. K_{H_2O} – положение критической точки воды. x_s и x_{H_2O} – относительные парциальные давления (%) насыщенных паров элементарной серы и воды соответственно. I–II – TP -области сосуществования серного расплава с газообразной водой (I) и водным конденсатом (II). 1–5 – расчетные точки (пояснения приведены в тексте).

б – образование серного расплава для излияний 1979 г. I_a – I_d – активные участки Центрального Восточного термального поля: I_a – центральная донная воронка озера Кипящего, I_b – юго-восточный участок, I_c – северный участок, I_d – северо-западный участок. Условные обозначения разреза: 1 – остатки разрушенной части экструзии Центрального Восточного купола; 2 – обвално-обломочные отложения; 3 – пирокластические отложения купольной мантии; 4–6 – донные отложения озера Кипящего [25]: синие (4), желтые (5) и серые (6) илы; 7 – серный расплав; 8 – просачивание серного расплава по пирокластическим отложениям купольной мантии к местам излияний 1979 г.

Fig. 7. Formation of sulfur melt for 1979 effusions.

a, TP diagram of sulfur and water condensation. The melting-solidification temperatures of sulfur and the temperature of the maximum viscosity of the sulfur melt are shown by vertical red dash-dotted lines, respectively. K_{H_2O} is the position of the critical point of the water. x_s and x_{H_2O} are the relative partial pressures (%) of saturated vapors of elemental sulfur and water, respectively. I–II, TP areas of coexistence of sulfur melt with gaseous water (I) and aqueous condensate (II). 1–5, calculation points.

b, formation of the sulfur melt for 1979 effusions. I_a – I_d , active sites of the Central Eastern Thermal Field: I_a , central bottom funnel of Kipyashcheye Lake, I_b , southeastern site, I_c , northern site, I_d , northwestern site. Symbols of the section: 1, remnants of the destroyed part of the extrusion of the Central Eastern Dome; 2, rockfall and clastic deposits; 3, pyroclastic deposits of the dome mantle; 4–6, bottom sediments of Kipyashcheye Lake [25]; blue (4), yellow (5), and gray (6) silts; 7, sulfur melt; 8, seepage of the sulfur melt from pyroclastic deposits of the dome mantle to the sites of the 1979 effusions.

* Малышев А.И., Малышева Л.К. 2026. Вода в эндогенном породо- и рудообразовании: вулкан Головнина. *Литосфера* (принята к печати).

дна озера на его побережье [17, 25]. Разрушение силикатов, титанатов и алюминатов приводит к освобождению SiO_2 , TiO_2 и Al_2O_3 и их участию в минералообразовании. SiO_2 осаждается в виде геля кремниевой кислоты, коагулируя в силикагель, а затем трансформируясь в опал. TiO_2 формирует как самостоятельные выделения, так и разнообразные сингенетические образования совместно с опалом, серой и сульфидами. Al_2O_3 совместно с SiO_2 образует гидротермальный каолинит, а также участвует в формировании алунита. Нейтрализация сильными кислотами ферратов, ферритов и цинкатов способствует соединению железа и цинка с серой, поскольку низкотемпературный конденсат серы, представленный замкнутыми кольцевыми молекулами и полимерными цепочками, слабо активен [31].

Аналогичные процессы протекают в зонах конденсации воды и серы внутри массивов горных пород. Георадарная съемка [26] на северном (рис. 7 б, участок I_c) и юго-восточном (рис. 7 б, участок I_b) участках побережья озера Кипящего установила на глубине 2–4 м однородный обводненный горизонт, из которого по каналам гидротермы поднимаются на поверхность. На юго-восточном участке имеются многочисленные кипящие источники. Многие источники вытекают из-под осыпи на склоне остатков Центрального Восточного купола, частично разрушенного последним сильным извержением вулкана 600–700 лет назад. Поэтому естественно предположить, что обводненный горизонт на юго-восточном участке продолжается вглубь постройки купола под его юго-восточный отрог.

Водоносный горизонт в постройке купола играет охлаждающую роль и способствует конденсации воды и серы. Однако уровни давления, при которых происходит конденсация воды и серы, в толще пород выше по сравнению с гидростатическим давлением озерных вод. 30-метровая толща перекрывающих пород юго-восточного отрога Центрального Восточного купола обеспечивает литостатическое давление ~ 0.9 МПа, что соответствует температуре конденсации/кипения воды 175°C (рис. 7а, точка 4). Более того, активное пере-

мещение газовых потоков в горных породах происходит под давлением, в среднем в 5 раз превышающим литостатический эквивалент [31]. В случае 30-метровой толщи перекрывающих пород – это “сверхдавление” может составлять ~ 4.1 МПа, что соответствует температуре конденсации/кипения воды 251°C (рис. 7 а, точка 5).

Поскольку водный горизонт охлаждает и тем самым контролирует температуру контактирующего с ним расплава серы, то образующийся под юго-восточным отрогом Центрального Восточного купола серный расплав имеет температуру, близкую или превышающую температуру максимальной вязкости серного расплава. Есть вероятность, что уходящий под склон купола юго-восточный участок в своей наиболее удаленной и высокотемпературной части постоянно или эпизодически выходит за пределы экструзивного тела в купольную мантию (рис. 7 б), состоящую из наслаивающихся обвальнo-пирокластических отложений и имеющую наклон в направлении от купола, т.е. в направлении расположенного примерно в 400 м и ниже на 7 м озера Горячего (рис. 1 с).

Возможность накопления серного расплава (и создания водоупорного горизонта для обводненного горизонта) в рыхлых пирокластических отложениях обусловлена экстремальной вязкостью полимерной серы при 187°C , при которой серный расплав практически теряет подвижность. Однако при охлаждении расплава (при постепенном осаждении/оползании полимерной серы в более холодные горизонты или в результате миграции газо-гидротермальных подводящих каналов, источников тепла) происходит повышение текучести серного расплава с минимумом вязкости при 159°C . Именно это ретроградное повышение текучести, по нашему мнению, привело к просачиванию серного расплава по слоистым пирокластическим породам (рис. 7 б) с последующим излиянием серных лав на побережье озера Горячего в августе 1979 г.

Просачивание эндогенных конденсатов происходит и в сторону озера Кипящего, что прежде всего демонстрируют многочисленные

гидротермальные источники юго-восточного участка, вытекающие из-под осыпи на склоне остатков Центрального Восточного купола. Однако серный конденсат здесь представлен твердой серой и теряет собственную мобильность из-за сравнительно низких температур охлаждающего водного горизонта при его выходе на поверхность (температура испарения/конденсации воды здесь 98.5 °С, тогда как температура отвердевания серы 112.8 °С). В отличие от серы отвердевание геля кремниевой кислоты контролируется не температурой, а потерей гидратной воды и последовательной трансформацией геля сначала в силикагель, а затем в опал. Поэтому на внутреннем склоне юго-восточного участка распространены натечные кремнистые коры [25, рис. 7], отмечаются серно-опаловые потоки и высачивания геля кремниевой кислоты [25, рис. 5].

Сравнение с аналогичными исследованиями

Из-за редкости наблюдений за активными серными потоками и изучением их состава представляется возможным сравнение полученных результатов лишь с исследованиями М. Иностранца с соавторами [16]. Исследование посвящено анализу физических и химических характеристик активных потоков серы, наблюдавшихся на вулкане Ластаррия (север Чили) в январе 2019 г. Вулкан проявляет высокую газовую активность и, имея типичный поток SO_2 около 800 т/сут, является одним из самых активных поставщиков вулканических газов в атмосферу среди вулканов севера Чили. В результате фумарольной активности на северном склоне вулкана образовались обширные фумарольные отложения – желтые корки и зоны изменений. Особенностью фумарольных отложений Ластаррии является наличие потоков серы длиной 220–350 м, которые были активны до 1964 г. В этой области в 2019 г. М. Иностранца с соавторами [16] обнаружили по спутниковым снимкам, а затем исследовали на месте новые активные потоки серы. Цели исследований: i) определение механизмов формирования потоков и бассейнов серы, ii) определение их хи-

мических и минеральных характеристик и iii) оценка возможного образования проявлений расплавленной серы.

Описанное в исследовании излияние серы в январе 2019 г. по объему излитой серы (~1.45 м³) и площади распространения имеет меньший масштаб по сравнению с каждым из излияний на вулкане Головнина в 1979 г. Поток серы на вулкане Ластаррия в 2019 г. по максимальной длине от источника (12 м) идентичен излияниям на вулкане Головнина, а процесс излияния серы наблюдался более длительное время: общая продолжительность излияния составила 408 мин на вулкане Ластаррия против 135 мин в третьем эпизоде на вулкане Головнина. При этом продолжительность излияния отдельных потоков (108, 150, 113, 80 и 67 мин) на вулкане Ластаррия сопоставима с продолжительностью излияния на вулкане Головнина. Хотя замеры температуры серного расплава на вулкане Головнина в 1979 г. не проводились, мы полагаем, что температурный режим (124–158 °С) серных излияний на обоих вулканах идентичен вследствие физико-химических свойств серного расплава.

Изучение вещества серных лав вулкана Ластаррия [16] выполнено при помощи рентгеноструктурного анализа, сканирующего электронного микроскопа, анализа микроэлементов и изотопного состава серы. Исследования показали, что затвердевшая сера состояла из самородной серы с незначительным содержанием галенита и минералов, содержащих мышьяк и йод. Анализ микроэлементов показал значительное содержание Bi, Sb, Sn, Cd, а также очень высокую концентрацию As (>40 000 ppm), что вдвое выше по сравнению с лавой вулкана Головнина (~20 100 ppm).

Рентгеноструктурный анализ выявил наличие самородной серы ромбической формы со степенью кристалличности 45% и 64% в образцах серной массы и потока серы, соответственно. Более детальный осмотр с использованием изображений высокого разрешения BSE (с обратным рассеянием электронов) показал присутствие кроме доминирующей серы Al, As, Fe, K, O, Si, Ti, I и Pb. Кроме того, были обнаружены характерные кристаллические

фазы размером менее 100 мкм, содержащие As, I и Pb. Фазы, содержащие As, были идентифицированы как возможные или содержащие примеси йода, реальгара и аурипигмента, в то время как минералы, содержащие Pb, были связаны с галенитом. Все фрагменты, содержащие Si, O, Fe, K, Al и Ti отнесены исследователями к фрагментам горной породы, включенным во время перемещения потока серы по подложке. Напротив, присутствие As, I и Pb, по мнению авторов [16], может быть объяснено магматической дегазацией.

Для эффузивов с незавершенным формированием кристаллических структур, большой долей стекловатого и аморфного вещества использование рентгеноструктурного анализа в качестве основы изучения, по нашему мнению, неэффективно и может привести к ошибочным выводам. Для геохимических реконструкций образования и поведения эндогенных конденсатов детализация кристаллических структур и микроэлементный состав конденсатов несущественны, поэтому мы не используем рентгеноструктурный и микроэлементный анализы на данном этапе. Изотопные смещения серы (и других летучих веществ), возникающие в процессах испарения–конденсации, значительны и полностью перекрывают диапазон наблюдаемых изотопных смещений в природной сере [31]. Это делает использование изотопного состава серы некорректным в генетических реконструкциях, выполненных без учета этих смещений.

Полное отнесение всех фрагментов, содержащих Si, O, Fe, K, Al, и Ti, к ксеногенным включениям выглядит искусственным и фактически блокирует реконструкции эпитепимального петрогенеза для вулкана Ластаррия. Наличие алунита и каолинита, сингенетичных серному расплаву и состоящих из перечисленных элементов, характерно для *TP*-условий сосуществования серного расплава с водным конденсатом (рис. 7 а, область II). Включения алунита присутствуют, например, в фумарольной сере в окрестностях кратерных озер вулка-

на Эбеко [32]. Это маловероятно для вулкана Ластаррия при отсутствии вулканических озер и обводненных горизонтов. Однако сульфидизация серного расплава с образованием преимущественно сульфидов железа, образование сингенетичных серному конденсату включений геля кремниевой кислоты (SiO_2) и диоксида титана обычны и встречаются как в подводных [17], так и в наземных [25]* отложениях серы. В результатах [16] нет сведений о раскристаллизации и самоочищении самородной серы. Стехиометрия сульфидов мышьяка не изучалась. Фазы, содержащие мышьяк, отнесены к реальгару и аурипигменту предположительно.

Происхождение расплавленной серы на вулкане Ластаррия, по мнению М. Иностранца с соавторами [16], объясняется усиленной конденсацией серы из-за фумарольных газов, обогащенных SO_2 и H_2S , а также с изменением проницаемости фумарольных каналов. Исследователи считают, что изменение проницаемости объясняет, почему расплавленная сера наблюдалась только в определенной области фумарольного поля. Хотя в исследовании [16] большое внимание уделено физическим свойствам серы, парциальное давление ее насыщенных паров в анализе условий образования серного расплава не учитывается. Данные об экстремальной вязкости полимерной серы при 187 °C и повышении текучести серы при более низких температурах авторам известны, но авторы не используют эти данные в анализе и выводах о происхождении серных потоков.

Заключение

Серный расплав для излияний 1979 г. сформировался на продолжении юго-восточного участка Центрального Восточного термального поля под юго-восточным отрогом Центрального Восточного купола. Мощность пород, перекрывающих зону конденсации серы, составила ~30 м. *TP*-условия образования серного расплава – 175–251 °C, 0.9–4.1 МПа. Накопление серного расплава обусловлено газовой

* Малышев А.И., Малышева Л.К. 2026. Вода в эндогенном пороодо- и рудообразовании: вулкан Головинина. *Литосфера* (принята к печати).

активностью и высокой вязкостью полимерной серы. При охлаждении расплава до 159 °С минимальная вязкость расплава сделала возможным его просачивание по наслоениям обвального-пирокластического материала купольной мантии в сторону озера Горячее.

Образование серного расплава происходило под влиянием охлаждающего водного горизонта с сингенетичным образованием микровключений кремнезема (гель кремниевой кислоты → силикагель → опал), алюмо-натрокалиевых квасцов (алунита), диоксида титана и сульфидов железа и цинка. При просачивании расплава к месту излияния и при излиянии расплав обогатился ксеногенными микровключениями вулканических пород и песчано-пемзовым материалом. Результирующий минеральный состав и структура лавы окончательно сформировались на месте излияния под воздействием неравномерного остывания, активного газоотделения, гравитационной дифференциации и самоочищения серы при ее кристаллизации. Песчано-пемзовые включения подверглись значительным изменениям. Поры таких включений полностью заполнены серным расплавом и сопутствующими ему микровключениями, а сами включения содержат признаки привноса кремнезема, особенно частые для песчаных включений в верхнем слое лавы. Под воздействием гравитационной дифференциации сформировался подошвенный слой, обогащенный тяжелыми сульфидами и песчаными включениями. Самоочищение серы при ее раскристаллизации способствовало концентрации микровключений и образованию в межкристаллическом пространстве сульфидного коллоидного субстрата, на основе которого происходило дорастание сульфидных кристаллов и агрегатов и образование новых центров кристаллизации. В центральном слое коричневой серы распространены пленочные выделения ранее неизвестного природного гексасульфида мышьяка, образующегося вследствие самоочищения мышьяковистой серы при ее раскристаллизации.

Результаты исследований показывают, что изучение вещества серных лав имеет большое

значение для понимания геохимической эволюции литосферы в эпитермальном диапазоне температур и не менее важно, чем исследования магматических пород для более высокотемпературных условий.

Список литературы

1. Мархинин Е.К. О состоянии вулканов острова Кунашир (март 1974 – май 1982 г.). *Вулканология и сейсмология*. 1983,1:43–51.
2. Watanabe T. Eruptions of molten sulphur from the Siretoko-Iosan volcano, Hokkaido, Japan. *Japanese Journal of Geology and Geography*. 1940,17(3–4):289–310.
3. Luke J. History in White Island. *Department of Scientific and Industrial Research Bulletin*. 1950,127:14–24.
4. Кирсанов И.Т., Серафимова Е.К., Сидоров С.С., Трубенко В.Ф., Фарберов А.И., Федорченко В.И., Шилов В.Н. Извержение вулкана Эбеко в марте-апреле 1963 г. *Бюллетень вулканологических станций*. 1964,36:66–72.
5. Skinner B.J. A sulfur lava flow on Mauna Loa. *Pacific Science*. 1970,24(1–4):144–145.
6. Colony W.E., Nordlie B.E. Liquid sulfur at volcano Azufre. Galapagos islands. *Economic Geology*. 1973,68(3):371–380.
7. Naranjo J.A. Sulphur flows at Lastarria volcano in the North Chilean Andes. *Nature*. 1985,313:778–780.
8. White D.E., Hutchinson R.A., Keith T.E.C. *The geology and remarkable thermal activity of Norris Geyser Basin, Yellowstone National Park, Wyoming*. Washington: 1988, p. 42–44.
9. Imai A., Geshi N. Spinifex texture of native sulfur: a cooling product of sulfur flow eruptions at Shiretoko-Iwosan volcano, Hokkaido, Japan. *Resource Geology*. 1999,49(2):99–104.
10. Harris A.J.L., Sherman S.B., Wright R. Discovery of self-combusting volcanic sulfur flows. *Geology*. 2000,28:415–418.
11. Mora-Amador R., Ramírez C. Sulfur flows at Poás volcano, Costa Rica. In: *Abstract Book: General assembly IAVCEI, Reykjavik (Iceland), 2008*. 2008, p. 85.
12. Masubuchi Y. Field occurrence and petrological characteristics of sulfur lava flow formed in May 2010 in Jigokudani, Tateyama volcano. *Volcanological Society Japan 2012 Fall Meeting*. 2012. https://doi.org/10.18940/vsj.2012.0_153.
13. González G., Mora-Amador R., Ramírez C., Rouwet D., Alpizar Y., Picado C., Mora R. Historic activity and hazard analysis of Turrialba volcano, Costa Rica.

- Revista Geologica América Central*. 2015,52:129–149. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i52.19033>
14. Mora Amador R.A., Rouwet D., Vargas P., Oppenheimer C. The Extraordinary Sulfur Volcanism of Poás from 1828 to 2018. In: Tassi, F., Vaselli, O., Mora Amador, R. (eds) *Poás Volcano. Series Active Volcanoes of the World*. Cham: Springer, 2019, p. 45–78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02156-0_3
 15. Власов Г.М. (ред.). *Вулканические серные месторождения и некоторые проблемы гидротермального рудообразования*. М.: Наука, 1971, 360 с.
 16. Inostroza M., Fernandez B., Aguilera F., Layana S., Walter T.R., Zimmer M., Rodríguez-Díaz A., Oelze M. Physical and chemical characteristics of active sulfur flows observed at Lastarria volcano (northern Chile) in January 2019. *Frontier Earth Science*. 2023,11:1197363. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1197363>
 17. Malyshev A., Malysheva L. Sulfur melt in Golovnin Caldera, Kunashir Island, Russia. *Journal Volcanology and Geothermal Research*. 2023,443:107933. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107933>
 18. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д., Литасова С.Н. Возраст действующих вулканов Курило-Камчатского региона. *Вулканоология и сейсмология*. 1994,4–5:5–32.
 19. Горшков Г.С. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 1967, 288 с. http://repo.kscnet.ru/156/1/Gorshkov_1967.pdf
 20. Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Морфология и генезис озер кальдерных комплексов Головнина и Заварицкого (Курильские острова). *Вестник ДВО РАН*. 2010,3:103–106.
 21. Kozlov D.N., Lebedeva E.V. Morphology of crater and caldera lakes in the Far Eastern region of Russia and the features of their development. *Journal of Mountain Science*. 2024,21(4):1246–1258. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8253-9>
 22. Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Новые данные о морфологии котловины озера Кипящее (вулкан Головнина, о. Кунашир, Курильские о-ва): по результатам работ 2023 г. *Геосистемы переходных зон*. 2025,9(2):213–220. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.213-220>; <https://www.elibrary.ru/kqsgqa>
 23. Kalacheva E.G., Taran Y.A., Voloshina E.V., Inguaggiato S. Hydrothermal system and acid lakes of Golovnin caldera, Kunashir, Kuril islands: geochemistry, solute fluxes and heat output. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2017,346:10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.001>
 24. Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Волошина Е.В., Тарасов К.В., Мельников Д.В., Котенко Т.А., Эрдниева Д.Ю. Кратерное озеро Кипящее в кальдере вулкана Головнина: геохимия воды и газов, вынос магматических летучих (о. Кунашир). *Вулканоология и сейсмология*. 2023,1:3–20.
 25. Малышев А.И., Малышева Л.К. Рудная сера вулкана Головнина, о-в Кунашир. *Литосфера*. 2024,24(5):886–910. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-886-910>
 26. Жарков Р.В. *Термальные источники Южных Курильских островов*. Владивосток: Дальнаука, 2014, 378 с.
 27. Belousov A., Belousova M., Kozlov D. Strong hydrothermal eruption 600 BP inside Golovnin Caldera, Kunashir Island, Kurile arc. In: *19th EGU General Assembly, EGU 2017: Proceedings from the conference held 23–28 April 2017, Vienna, Austria*. 2017:7596.
 28. Малышев А.И., Малышева Л.К. Серный расплав на дне оз. Кипящее, кальдера Головнина, о-в Кунашир. В кн.: *Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXIX ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 30 марта - 4 апреля 2026 г.* Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2026, 263–266 с.
 29. Rickard D.T. *Framboids*. Verlad: Oxford University Press, 2021, 360 p.
 30. Малышев А.И., Малышева Л.К. Водно-осажденная сера вулканов Головнина и Менделеева (остров Кунашир, Южные Курильские острова, Россия). *Геосистемы переходных зон*. 2025,9(4):452–477. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.452-477>
 31. Malyshev A., Malysheva L. Sulfur in ore formation. *Ore Geology Reviews*. 2022,150:105199. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105199>
 32. Shevko, E.P., Bortnikova, S.B., Abrosimova, N.A., Kamenetsky V.S., Bortnikova S.P., Panin G.L., Zelenski M. Trace elements and minerals in fumarolic sulfur: the case of Ebeko volcano, Kuriles. *Geofluids*. 2018,2018:4586363. <https://doi.org/10.1155/2018/4586363>

References

1. Markhinin E.K. [On the state of the volcanoes of Kunashir Island (March 1974 – May 1982)]. *Volcanology & Seismology*. 1983,1:43–51. (In Russ.).
2. Watanabe T. Eruptions of molten sulphursulphur from the Siretoko-Iosan volcano, Hokkaido, Japan. *Japanese Journal of Geology and Geography*. 1940,17(3–4):289–310.
3. Luke J. History in White Island. *Department of Scientific and Industrial Research Bulletin*. 1950,127: 14–24.
4. Kirsanov I.T., Serafimova E.K., Sidorov S.S., Trubenko V.F., Farberov A.I., Fedorchenko V.I., Shilov V.N. The eruption of Ebeko volcano in March-April, 1963.

- Bulletin Volcanologicheskikh Stantsiy.* 1964,36:66–72. (In Russ.).
5. Skinner B.J. A sulfur lava flow on Mauna Loa. *Pacific Science.* 1970,24(1–4):144–145.
 6. Colony W.E., Nordlie B.E. Liquid sulfur at volcano Azufre. *Galapagos islands. Economic Geology.* 1973,68(3):371–380.
 7. Naranjo J.A. Sulphur flows at Lastarria volcano in the North Chilean Andes. *Nature.* 1985,313:778–780.
 8. White D.E., Hutchinson R.A., Keith T.E.C. *The geology and remarkable thermal activity of Norris Geyser Basin, Yellowstone National Park, Wyoming.* Washington, 1988, p. 42–44.
 9. Imai A., Geshi N. Spinifex texture of native sulfur: a cooling product of sulfur flow eruptions at Shiretoko-Iwosan volcano, Hokkaido, Japan. *Resource Geology.* 1999,49(2):99–104.
 10. Harris A.J.L., Sherman S.B., Wright R. Discovery of self-combusting volcanic sulfur flows. *Geology.* 2000,28:415–418.
 11. Mora-Amador R., Ramírez C. Sulfur flows at Poás volcano, Costa Rica. In: *Abstract Book: General assembly IAVCEI, Reykjavik (Iceland), 2008.* 2008, p. 85.
 12. Masubuchi Y. Field occurrence and petrological characteristics of sulfur lava flow formed in may 2010 in Jigokudani, Tateyama volcano. *Volcanological Society Japan 2012 Fall Meeting.* 2012. https://doi.org/10.18940/vsj.2012.0_153.
 13. González G., Mora-Amador R., Ramírez C., Rouwet D., Alpizar Y., Picado C., Mora R. Historic activity and hazard analysis of Turrialba volcano, Costa Rica. *Revista Geologica América Central.* 2015,52:129–149. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i52.19033>
 14. Mora Amador R.A., Rouwet D., Vargas P., Oppenheimer C. The Extraordinary Sulfur Volcanism of Poás from 1828 to 2018. In: Tassi, F., Vaselli, O., Mora Amador, R. (eds) *Poás Volcano. Series Active Volcanoes of the World.* Cham: Springer, 2019, p. 45–78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02156-0_3
 15. Vlasov G.M. (ed.). [*Volcanic sulfur deposits and some problems of hydrothermal ore formation*]. Moscow: Nauka, 1971, 360 p. (In Russ.).
 16. Inostroza M., Fernandez B., Aguilera F., Layana S., Walter T.R., Zimmer M., Rodríguez-Díaz A., Oelze M. Physical and chemical characteristics of active sulfur flows observed at Lastarria volcano (northern Chile) in January 2019. *Frontiers Earth Science.* 2023,11:1197363. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1197363>
 17. Malyshev A., Malysheva L. Sulfur melt in Golovnin Caldera, Kunashir Island, Russia. *Journal Volcanology and Geothermal Research.* 2023,443:107933. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107933>
 18. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomoreva V.V., Sulerzhitsky L.D., Litasova S.N. [The ages of active volcanoes of the Kuril-Kamchatka region]. *Volcanology & Seismology.* 1994,4-5:5–32. (In Russ.).
 19. Gorshkov G.S. [*Volcanism of the Kuril island arc*]. Moscow: Nauka, 1967, 288 p. (In Russ.). http://repo.kscnet.ru/156/1/Gorshkov_1967.pdf (accessed 15.10.2023).
 20. Kozlov D.N., Zharkov R.V. [Morphology and Genesis of Lakes in the Caldera Complexes of Golovnin and Zavaritsky (Kuril Islands)]. *Vestnik of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.* 2010,3:103–106. (In Russ.).
 21. Kozlov D.N., Lebedeva E.V. Morphology of crater and caldera lakes in the Far Eastern region of Russia and the features of their development. *Journal of Mountain Science.* 2024,21(4):1246–1258. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8253-9>
 22. Kozlov D.N., Zharkov R.V. [New data on the morphology of the basin of Kipyayushcheye lake (Golovnin volcano, Kunashir island, Kuril islands): based on the results of studies carried out in 2023]. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones.* 2025,9(2):213–220. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.2.213-220>
 23. Kalacheva E.G., Taran Y.A., Voloshina E.V., Inguaggiato S. Hydrothermal system and acid lakes of Golovnin caldera, Kunashir, Kuril islands: geochemistry, solute fluxes and heat output. *Journal Volcanology Geothermal Research.* 2017,346:10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.001>
 24. Kalacheva E.G., Taran Y.A., Voloshina E.V., Tarasov K.V., Melnikov D.V., Kotenko T.A., Erdnieva D.M. Crater lake Kipyashchee in the caldera of Golovnin volcano: water and gas geochemistry, output of magmatic volatiles (Kunashir island). *Journal of Volcanology and Seismology.* 2023,17:1–16. <https://doi.org/10.1134/S0742046322700063>
 25. Malyshev A.I., Malysheva L.K. [Ore sulfur of Golovnin Volcano, Kunashir island]. *Lithosphere.* 2024,24(5):886–910. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-886-910>
 26. Zharkov R.V. [*Thermal springs of the Southern Kuril Islands*]. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2014, 378 p. (In Russ.).
 27. Belousov A., Belousova M., Kozlov D. 2017. Strong hydrothermal eruption 600 BP inside Golovnin Caldera, Kunashir Island, Kurile arc. In: *19th EGU General Assembly, EGU 2017: Proceedings from the conference held 23–28 April 2017, Vienna, Austria.* 2017:7596.
 28. Malyshev A.I., Malysheva L.K. [Sulfur melt at the bottom of Kipyashcheye lake, Golovnin caldera, Kunashir island]. In: *Volcanism and related processes: Proceedings of the XXIX Annual Scientific Conference dedicated to Volcanologists Day, Petropavlovsk-Kamchatsky, March 30 - April 4, 2026.* Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS FEB RAS, 2026, p. 263–266. (In Russ.).

29. Rickard D.T. *Framboids*. Verlad: Oxford University Press, 2021, 360 p.
30. Malyshev A.I., Malysheva L.K. Water-deposited sulfur of Golovnin and Mendelev volcanoes (Kunashir island, Southern Kuril islands, Russia). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*. 2025,9(4):24. <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2025-4-9.pdf>; <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.452-477>
31. Malyshev A., Malysheva L. Sulfur in ore formation. *Ore Geology Reviews*. 2022,150:105199. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105199>
32. Shevko E.P., Bortnikova S.B., Abrosimova N.A., Kamenetsky V.S., Bortnikova S.P., Panin G.L., Zelenski M. Trace elements and minerals in fumarolic sulfur: the case of Ebeko volcano, Kuriles. *Geofluids*. 2018,2018:4586363. <https://doi.org/10.1155/2018/4586363>

Об авторах

✉ **Малышев Александр Иванович**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатории палеовулканизма и региональной геодинамики, Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН (ИГГ УрО РАН), Екатеринбург, Россия, malyshev@igg.uran.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4306-8000>

Малышева Лидия Константиновна, научный сотрудник, лаборатории палеовулканизма и региональной геодинамики, Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН (ИГГ УрО РАН), Екатеринбург, Россия, malysheva@igg.uran.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2784-2182>

About the Authors

✉ **Malyshev, Aleksandr I.**, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Lead Researcher, Laboratory of Paleovolcanism and Regional Geodynamics, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, malyshev@igg.uran.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4306-8000>

Malysheva, Lidiia K., Researcher, Laboratory of Paleovolcanism and Regional Geodynamics, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, malysheva@igg.uran.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2784-2182>

Поступила 14.07.2026

Принята к публикации 19.08.2026

Received 14 July 2026

Accepted 19 August 2026