

Серный расплав на дне оз. Кипящее, кальдера Головнина, о-в Кунашир

Малышев А.И., Малышева Л.К.

Sulfur melt at the bottom of Kipyashee Lake, Golovnin caldera, Kunashir Island

Malyshev A.I., Malysheva L.K.

Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург;

e-mail: malyshev@igg.uran.ru

Проанализированы условия образования расплава серы на дне оз. Кипящее. Отмечается текущая тенденция к повышению донной газо-гидротермальной активности, выражающаяся в повышении температуры и минерализации серного расплава, а также к усилению пенообразования с выносом каолининовой пены и серных шариков на поверхность озера.

Введение

Спектр представлений о формировании вулканогенных месторождений самородной серы можно свести к двум доминирующим точкам зрения. Одна из них [4] рассматривает серу как конечный продукт гидротермального рудообразующего процесса, другая [1, 3] исходит из природного круговорота серы, при котором накопление ее промышленных концентраций происходит в водной среде. Применительно к вулканическим кратерным озерам обе точки зрения сходятся – сера здесь имеет экзогенно-осадочное (коллоидное) происхождение и образуется вследствие взаимодействия вулканических газов между собой и с атмосферным кислородом в водной среде. Этот консенсус сохраняется применительно ко всем вулканическим кратерным и термальным озерам [10].

Кальдера Головнина (48.87° с.ш., 145.50° в.д.) – самый южный вулканический центр Курильских островов. Она образовалась ~38 тыс. лет назад [2] и в современном состоянии имеет диаметр около 6 км. В посткальдерный период вулканическая активность привела к образованию экструзивных куполов андезито-дацитового состава. Максимальная высота края кальдеры составляет 547 м. Дно кальдеры имеет небольшой уклон к северо-востоку, где расположено оз. Горячее. Около 1300-1420 гг. н.э. в пределах 4-й террасы у южного подножия Центрально-Восточного купола произошло сильное извержение [9]. При этом образовался кратер шириной 350 м и глубиной 40 м, частично заполненный в настоящее время оз. Кипящее. Оба внутрикальдерных озера гидротермально активны. Их гидрохимия, баланс растворенных веществ и теплоотдача охарактеризованы в [5, 11].

Генезис донного расплава самородной серы

Полевые наблюдения и микроструктурные исследования, послужившие основой для вывода о существовании донного серного расплава в оз. Кипящее, подробно изложены в работах [6, 12].

Вода кратерных и геотермальных озер (и, более того, морей и океанов) является охлаждающим горизонтом с высокой теплоемкостью и теплопроводностью. Когда высокотемпературные флюидные потоки достигают горизонта охлаждения, происходит принудительное охлаждение эндогенной газоконденсатной смеси, приводящее к образованию дополнительных конденсатов и интенсивным гетерогенным химическим реакциям между флюидной смесью и вновь образовавшимися конденсатами. Это охлаждение эндогенных флюидов придонными водами вызывает образование расплава серы на дне озер в кальдере Головнина и в других подобных случаях [10].

Магмы среднекислотного состава, характерные для последних извержений вулкана Головнина, способны генерировать потоки флюида с соотношением S/H₂O до 0.03. Это значение получено на основе обобщения [8] работ, в которых опубликованы результаты анализа стекол однородных расплавных включений в минералах, а также закалочных стекол вулканических пород океанского дна.

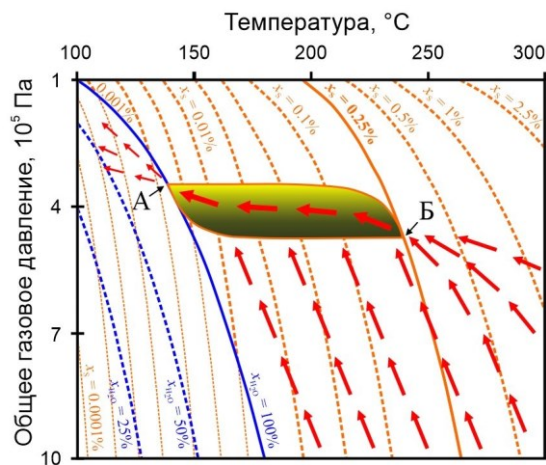
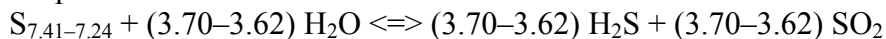


Рис. 1. Образование расплава серы в кратерной впадине оз. Кипящее. x_S и x_{H_2O} – относительные парциальные давления насыщенных паров элементарной серы и воды, соответственно.

Начало конденсации серы при исходном соотношении $S/H_2O=0.03$ в диапазоне давлений 0.1-1.0 МПа соответствует диапазону температур 197-264 °С. Среднее число атомов в молекулах паров серы в этом диапазоне температур изменяется незначительно ($N_S=7.41-7.24$). Поэтому исходное соотношение $S/H_2O=0.03$ соответствует изолинии парциального давления насыщения $x_S=0.25\%$ (рис. 1). В рассматриваемой области давлений и температур равновесие в реакциях между газами смещено в сторону тяжелой молекулы газообразной серы. Например, при взаимодействии серосодержащих газов с водяным паром



левая часть уравнения соответствует 4.70-4.62 молям газа, в то время как правая часть содержит 7.40-7.24 молей. Более чем полуторакратный дисбаланс объемов газа между левой и правой частями реакции определяет сдвиг равновесия в сторону уменьшения объема газа и образования тяжелой молекулярной серы еще до начала ее конденсации. Это позволяет применить исходное соотношение $S/H_2O=0.03$ к содержанию серы в элементарной форме. Содержанием (давлением) других сернистых газов (H_2S и SO_2) в первом приближении можно пренебречь, поскольку, во-первых, они содержат незначительную часть общего весового потенциала серы, а во-вторых, сера из них будет уходить по мере возникновения условий для ее конденсации.

Статическое давление на дне кратера оз. Кипящее (0.346 МПа) обуславливает конденсацию воды при температуре 138.5 °С (рис. 1, точка А). В этой точке парциальное давление насыщения серы $x_S=0.0033\%$. Это ограничение обуславливает конденсацию 98.5 % серы, которая накапливается в виде расплава в донных отложениях озера. Предположим, что в кратере оз. Кипящее находится 5 м расплава серы с 25%-ной сульфидизацией. Статическое давление 0.474 МПа на дне расплава соответствует температуре начала конденсации (кипения) серы 240 °С при $x_S=0.25\%$. Из-за охлаждения серным расплавом TP -траектории более высокотемпературных флюидов вынуждены сходиться к точке Б (см. рис. 1). То есть, серный расплав концентрирует в себе все траектории эндогенных газов, забирая из их состава избыточную серу.

Таким образом, эндогенный расплав элементарной серы образуется в донных отложениях озера кальдеры Головнина в результате охлаждающего воздействия озерных вод на высокотемпературные флюидные потоки. Этот процесс наиболее активен в кратерных впадинах на дне озер, где сульфидизация расплава серы происходит одновременно с конденсацией самой серы. Гравитационное осаждение сульфидов в расплаве приводит к обогащению ими корневых частей кратерных впадин, где в режиме реального времени формируются колчеданные рудные тела.

Текущая тенденция к повышению активности

Отмечается общая многолетняя тенденция к усилению донной кратерной активности в оз. Кипящее. Во-первых, поверхность озера в сентябре 2025 г. часто была

покрыта большим количеством пены (рис. 2), которая иногда скапливалась в виде пенной «плотины» в истоке протоки из озера (рис. 3). В 2021-2024 гг. столь активное пенообразование не наблюдалось.



Рис. 2. Скопления пены на поверхности оз. Кипящее утром 12 сентября 2025 г.



Рис. 3. Пенная «плотина» в истоках протоки из оз. Кипящее утром 12 сентября 2025 г.

Во-вторых, с 2024 г. в составе гидротермальной пены появились крупные пустотелые шарики самородной серы (рис. 4). Сам факт появления таких шариков свидетельствует об изменении температуры донного серного расплава в сторону повышения его полимерности. Пик полимерности серы приходится на температуру 187 °С. Температура конденсации воды на дне кратерной воронки оз. Кипящее составляет 138.5 °С (см. рис. 1). Это значение ограничивает максимальную температуру поверхности серного расплава. Следовательно, приближение к температурному пику полимерности серного расплава возможно только за счет повышения его температуры в подповерхностных слоях под воздействием глубинной газовой активности.



Рис. 4. Обычные микрошарики самородной серы с пляжей оз. Кипящее (слева), крупные пустотелые шарики сентября 2024 г. (в центре) и сентября 2025 г. (справа).

В-третьих, в 2025 г. пустотелые шарики серы существенно потемнели (см. рис. 4) 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.

В-четвертых, количество водно-осажденной серы существенно возросло не только в мелких ручьях Черепяхового термального поля, но и в мелких ручьях у юго-восточного и северо-западного берегов оз. Кипящее (рис. 5), что свидетельствует о повышении глубинной активности газов группы серы.



Рис. 5. Повышенное количество водно-осажденной серы в мелких ручьях юго-восточного побережья оз. Кипящее.

Тенденция к росту газовой активности требует особого внимания, так как может привести к излияниям серных лав и/или сильным газовым выбросам по аналогии с излиянием серных лав в августе 1979 г. и газовым выбросом августа 1980 г. [7].

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН № 124020400013-1 с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН.

Список литературы

1. *Аверьянов И.П.* Баланс серы в поствулканическом процессе и проблемы промышленного серонакопления. М.: Наука, 1981. 179 с.
2. *Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В. и др.* Возраст действующих вулканов Курило-Камчатского региона // *Вулканология и сейсмология*. 1994. № 4-5. С. 5-32.
3. *Виноградов В.И.* Роль осадочного цикла в геохимии изотопов серы. М.: Наука, 1980. 192 с.
4. Вулканические серные месторождения и некоторые проблемы гидротермального рудообразования / Под ред. Г.М. Власова. М.: Наука, 1971. 360 с.
5. *Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Волошина Е.В. и др.* Кратерное озеро Кипящее в кальдере вулкана Головнина: геохимия воды и газов, вынос магматических летучих (о. Кунашир) // *Вулканология и сейсмология*. 2023. Т. 17. № 1. С. 3-20. <https://doi.org/10.31857/S0203030622700018>
6. *Мальшев А.И., Мальшева Л.К.* Рудная сера вулкана Головнина, о-в Кунашир // *Литосфера*. 2024. Т. 24. № 5. С. 886-910. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-886-910>
7. *Мархинин Е.К.* О состоянии вулканов острова Кунашир (март 1974 – май 1982 гг.) // *Вулканология и сейсмология*. 1983. № 1. С. 43-51.
8. *Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Коваленко В.И.* Магматические летучие и их участие в формировании рудообразующих флюидов // *Геология рудных месторождений*. 1997. Т. 39. № 6. С. 451-460.
9. *Belousov A., Belousova M., Kozlov D.* Strong hydrothermal eruption 600 BP inside Golovnin Caldera, Kunashir Island, Kurile arc. // *Geophysical Research Abstracts*. 2017. V. 19. EGU2017-7596.
10. *Delmelle P., Bernard A.* The remarkable chemistry of sulfur in hyper-acid crater lakes: A scientific tribute to Bokuichiro Takano and Minoru Kusakabe. In: Rouwet D., Christenson B., Tassi F., Vandemeulebrouck J. (eds) *Volcanic Lakes. Advances in Volcanology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015. P. 239-259. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36833-2_10
11. *Kalacheva E., Taran Yu., Voloshina E., 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. V. 346. P. 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.001>
12. *Malyshev A., Malysheva L.* Sulfur melt in Golovnin Caldera, Kunashir Island, Russia // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2023. V. 443. Art. 107933. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107933>