

Кислое кратерное озеро вулкана Горелого (Камчатка)

Введение

Одной из важных задач вулканологических исследований является изучение современных высоко-температурных магматогенных геотермальных систем, в недрах которых происходят процессы эндогенного рудообразования. Для решения этой задачи требуется рассмотрение обстановок локализации и условий формирования гидротермальных руд, «что может быть выполнено при совместном рассмотрении материалов как по рудам палеовулканических провинций, так и по современным наземным и подводным гидротермальным рудообразующим системам» [1].

Вулкан Горелый входит в южную часть Восточного вулканического пояса Камчатки. Расположен он в 75 км к югу от Петропавловска-Камчатского и в настоящее время активен. Постройка вулкана представляет собой хребет, сформированный из нескольких перекрывающих друг друга конусов и большого количества моногенных шлаковых построек побочных прорывов. На вершине вулкана имеется 4 крупных кратера, внутри которых располагается ряд мелких гнездообразных кратеров. Максимальная высота постройки 1 829 м.

За исторический период Горелый извергался не менее 10 раз. Последние его извержения происходили в начале и середине 1980-х гг. и характеризовались фреатомагматической деятельностью с выбросом пара и пирокластики на высоту от сотен до 5 000 м. Как извержения, так и интенсивная фумарольная деятельность в межпараксизмальные периоды приурочены к центральному кратеру вулкана, где и расположено в настоящее время кислое термальное озеро [4].

Исследования, проводимые на вулкане в последние десятилетия, касались, главным образом, изучения строения его постройки, истории развития и описанию конкретных извержений и их продуктов. Об озерах вулкана и, в частности, о кислом озере в центральном кратере можно встретить лишь отрывочные сведения, по которым можно судить, что оно существовало в 1960, 1978, 1979, 1980 и 1984 гг. [3]. Перед каждым извержением вулкана озеро исчезало, а на его месте оставалась колодцеобразная воронка глубиной порядка 100 м, на дне которой, например в 1985 г., наблюдалось светящееся пятно, ярко-желтый цвет которого свидетельствовал о температурах на дне кратера порядка 1 000 °С.

Термальное озеро в активном кратере влк. Горелого последний раз возникло и существует поныне после извержения 1985–1986 гг. Впервые к поверхности озера удалось спуститься и отобрать пробы воды летом 1996 г. Как и следовало ожидать, по своим основным характеристикам вода озера влк. Горелого оказалась идентична водам кислых кратерных озер других вулканов мира: температура воды была ~40 °С, она имела высокую кислотность (рН ~ 1) и минерализацию (> 20 г/л). А большое содержание коллоидной серы придавало ей ярко-бирюзовый цвет, характерный для кислых кратерных озер (таблица).

Через несколько лет, в 2000 и 2001 гг., удалось повторить отбор озерных вод в активном центральном кратере вулкана. Результаты химическо-

го анализа в общих чертах подтвердили данные 1996 г. (таблица). В последующие 2002 и 2005 гг. пробы воды из озера не отбирались. Тем не менее, визуальные наблюдения за субазральной и субаквальной деятельностью в эти годы показали, что активность в центральном кратере осталась практически на прежнем уровне. Об этом убедительно свидетельствует постоянное движение воды на поверхности озера, являющееся результатом высокой турбулентности водных масс озера из-за непрекращающейся подводной активности.

Рассматриваемое озеро расположено в центральном, активном кратере влк. Горелого. В центре этого кратера, имеющего телескопическое строение, расположена воронка колодцеобразной формы с высотой отвесных стенок над урезом озерных вод порядка 50 м и диаметром самого озера 60–70 м. Учитывая форму стенок колодца, свидетельства очевидцев, наблюдавших его, когда в нем не было воды, а также характерный для аналогичных озер уклон дна (30–45°), можно предполагать, что глубина кратерного озера составляет не менее 25–30 м.

На выровненных площадках, в стенках кратера, в бортах колодца, в том числе и вблизи уреза воды, располагаются многочисленные фумарольные выходы, некоторые из которых увенчаны постройками из серы. Визуальные наблюдения субазральной фумарольной деятельности в 1996 г. и сравнение ее с 2000 и 2001 гг. показали, что она заметно снизилась. Хотя это ни в коей мере не означает, что снизилась общая, суммарная активность в центральном кратере вулкана. Об этом весьма убедительно свидетельствуют наши ежегодные наблюдения за постоянным движением воды на поверхности озера вследствие высокой турбулентности водных масс из-за непрекращающейся подводной активности, а также данные об изменении за последние 5 лет физико-химических параметров кратерного озера, воды которого, без сомнения, являются аккумулятором преобладающей части выносимых из глубины на поверхность вулканических флюидов.

Отмечены были нами и ряд других, более частных, специфических изменений, произошедших в водах озера за последние годы: это касается направленных изменений их степени нейтрализации по [5] отношению железа к алюминию, серы к хлору и концентраций бора и тетрагидратов, как наиболее преобладающего компонента в общем содержании полигидратов.

Подтверждением вышесказанному служат полученные нами данные, которые вынесены в таблицу. Так, в начале 2000-х гг. температура озерных вод, в сравнении с 1996 г., возросла с 37 до 44,5 °С, общая минерализация увеличилась более чем в 1,5 раза, а рН кратерно-озерных вод снизился с 1,1 до 0,7–0,8 (таблица).

Измерение уровня озера за время наблюдений показало, что он постоянно повышается: за 5 лет, начиная с 1996 г., он поднялся на 5,5 м. И это не связано с сезонными вариациями в поступлении метеорных и вадозных вод в бессточное озеро с его водосбора, поскольку сопоставление уровней озерных вод проводилось в один и тот же сезон и при одинаковых погодных условиях. Очевидно, что повышение уровня озера связано с заполнением его

Изменения ряда физико-химических параметров, характеризующих воды термального озера активного кратера вулкана Горелого в период с 1996 по 2001 гг.

Параметр \ Год отбора проб	1996	2000	2001
T °C	37	42	44,5
PH	1,1	0,8	0,7
M, г/л	22,7	33,1	36,3
B, мг/л	24,5	7,0	6,5
S ₄ O ₆ ²⁻ , г/л	0,5	4,4	6,3
ΣS/Cl	1,6	1,2	0,7
ΣFe/Al	6,5	1,45	1,05
DN	0,4	0,25	0,25

Примечания: M – общая минерализация вод озера; ΣS и ΣFe – общее содержание растворенных в в озерных водах соединений разнвалентной серы и суммы (Fe²⁺ + Fe³⁺), соответственно; B и S₄O₆²⁻ – концентрации бора и тетрагидратов в водах озера; DN – «степень нейтрализации» = $\frac{\Sigma(Na+Mg)}{\Sigma(Na+K+Ca+Mg+Al+Fe)}$ по [Varekamp et al., 2000].

дна материалом обвалов, постоянно происходящих в летне-осенний период со стенок активной воронки, а также с непрекращающейся за все годы наблюдений субаквальной газо-гидротермальной деятельностью. А связь между активностью в бессточных кратерных озерах и их уровнем прямая. Это наглядно показано В. Н. Двигало (2000) по результатам его фотограмметрических измерений уровня бессточного кратерного озера влк. Мал. Семячика и одним из авторов данного сообщения на основании построенной им гидрологической модели этого озера, где из анализа уравнений теплового и водного балансов в разные периоды его жизни было установлено, что при постоянной и достаточно высокой активности на дне бессточного кратерного озера объем его вод неуклонно растет, соответственно, повышается и их уровень [Гавриленко, 2000].

Как уже отмечалось выше, озеро в активном кратере влк. Горелого за последние 40 лет неоднократно возникало и исчезало. Естественно, что исчезновение его происходило накануне извержений вулкана, предшествуя им. Так, например, было в 1980 и 1984 гг. Но были ли другие предвестники извержений, связанные с озером и, в частности, с физико-химическими характеристиками его вод? Очевидно, были. Об этом косвенно могут свидетельствовать результаты исследований зарубежных вулканологов на кратерных озерах Руанеху (Новая Зеландия), Югама (Япония), Поас (Коста Рика) накануне извержений вулканов, в активных кратерах которых они расположены. В качестве предвестников извержений в этих озерах исследователями апробированы такие гидрохимические параметры, как отношения серы, фтора, магния и полигидрофторидов к хлорид-иону. Причем последний параметр, т. е. содержание в озерных водах полигидрофторидов или их отношение к хлорид-иону, оказался самым универсальным и наиболее эффективным предвестником извержений для перечисленных выше объектов. А именно: за несколько месяцев до извержений в кратерно-озерных водах резко, практически до нуля, падало содержание полигидрофторидов. И это при отсутствии сейсмической подготовки, например, накануне извержения в 1988 г. влк. Кусатсу-Ширане, в активном кратере которого находится оз. Югама. Вероятно, апробированные на других озерах предвестники могут быть

использованы и в нашем случае, т. е. в кратерном озере влк. Горелого.

Итак, полученные новые данные для кратерного озера влк. Горелого показали следующие характерные черты, касающиеся эволюции его вод:

В результате непрекращающейся за все годы наблюдений (с 1992 по 2001 г.) субаквальной и субаквальной фумарольной деятельности в центральном кратере вулкана температура, кислотность и содержание растворенных компонентов в водах термального озера, находящегося в его центре, неуклонно росли.

При этом с увеличением времени контакта озерных масс с вулканитами дна озера и с постоянно продолжающейся рециркуляцией озерных вод в недрах постройки вулкана, в озеро поступает все большее количество породообразующих элементов, формирующих катионный состав кратерно-озерных вод. Причем на начальных этапах в раствор поступают наиболее подвижные, легко выщелачиваемые из вулканитов элементы, такие, как Na, Mg, Fe и Si. А это, в свою очередь, отражается на изменении «степени нейтрализации» кратерно-озерных вод = $\frac{\Sigma(Na+Mg)}{\Sigma(Na+K+Ca+Mg+Al+Fe)}$ [Varekamp et al., 2000] и на отношениях ΣFe/Al.

За 5 лет (с 1996 по 2001 г.) изменения таких параметров, как Mg/Cl и ΣS/Cl-отношения, содержания бора и полигидрофторидов (у нас: тетрагидратов), признанные рядом исследователей в качестве неплохих предвестников извержений, не позволяют нам ожидать, по крайней мере в ближайшее время, извержения в активном кратере влк. Горелого.

Выводы. Проведенные в последние годы работы на озере влк. Горелого показали, что его воды являются типичными для кислых термальных озер мира, а изменения ряда их физико-химических параметров на протяжении 5 лет не противоречат обнаруженной для других озер закономерности в их эволюции. И это дает нам надежду на то, что накануне возможного в будущем извержения вулкана в его озерных водах, т. е. еще задолго до исчезновения самого озера, гидрохимические предвестники поведут себя адекватно поведению их перед извержениями в озерах других активных вулканов мира. И даже если сейсмологический мониторинг, в настоящее время хорошо отлаженный и апробированный на влк. Горелом, оперативно и надежно предскажет очередное извержение, то даже в этом случае гидрохимические исследования дадут нам, по крайней мере, оценку целесообразности и эффективности их проведения на термальном озере исследуемого вулкана.

Работа выполнена по программе и при поддержке грантов № НШ-2294.2003.5: Программа государственной поддержки ведущих научных школ и РФФИ № 02-05-64979.

Список литературы

1. Авдейко Г. П., Краснов С. Г. Сульфидные руды и их связь с подводными вулканами и гидротермами островных дуг // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 26–39.
2. Гавриленко Г. М. Гидрологическая модель кратерного озера вулкана Малый Семячик (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2000. № 6. С. 21–31.
3. Кирсанов И. Т., Озеров А. Ю. Состав продуктов и энергетический эффект извержения вулкана Горелый в 1980–1981 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 25–42.
4. Мелекесцев И. В., Брайцева О. А., Пономарева В. В. Динамика активности вулканов Мутновский и Горелый в голоцене и вулканическая опасность для прилегающих районов (по данным тифрохронологических исследований) // Вулканология и сейсмология. 1987. № 3. С. 3–18.
5. Varekamp J. C., Pasternack G. B., Rowe Jr. G. L. 2000. Volcanic lake systematics II. Chemical constraints // Journal of Volcanol. and Geothermal Res. Vol. 97. P. 161–179.