

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕРМАЛЬНОГО ОЗЕРА В АКТИВНОМ КРАТЕРЕ ВУЛКАНА ГОРЕЛЫЙ (КАМЧАТКА)

Гавриленко Г.М., Мельников Д.В., Овсянников А.А.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: geo_gavrilenko@mail.ru*

Введение

Изучение кислых термальных озер, локализованных в кратерах активных вулканов, представляет как теоретический, так и практический интерес, что обусловлено их связью с процессами близповерхностной газогидротермальной деятельности и современным эндогенным рудообразованием. Кроме того, исследования кратерных озер активных вулканов актуальны в связи с проблемой средне- и краткосрочного прогноза извержений и оценкой опасности, связанной с ними. Озеро в активном кратере в. Горелый в этом плане является идеальным объектом, где могут решаться перечисленные выше задачи.

Озера – это природные водоемы в углублениях суши (котловинах), заполненные разнородными водными массами. Имеется немало работ, посвященных генетической классификации озер, поскольку определение типа озера сводится к выяснению его генезиса, который определяет не только морфологию, но и другие особенности озера. В разное время целым рядом авторов предлагались различные классификации озер, основанные на их генезисе. Хотя в настоящее время твердо установлено, что тип озера является не только функцией генезиса котловины, но и функцией истории его развития в определенной физико-географической среде.

Одна из наиболее приемлемых в настоящее время генетических классификаций озер предложена М.А. Первухиным (1937). Среди основных классов озер он выделяет: I – эндогенные; II – экзогенные; III – органогенные; IV – антропогенные и V – смешанные (гетерогенные). В данном сообщении рассматривается одно из озер I типа, 2-го подтипа, т.е. вулканическое (бессточное) озеро, а именно - кратерное озеро вулкана Горелый (Южная Камчатка).

Формы проявления современного вулканизма на нашей планете весьма разнообразны вследствие огромного различия условий и обстановок, в которых вулканическая активность реализуется на земной поверхности. Так, среди многообразия обводненных активных вулканических сооружений с различными гидрологическими режимами особое место занимают вулканы, в активных кратерах которых существуют различные периоды времени кислые термальные озера. Приблизительно 12% из более чем 700 наземных голоценовых вулканов Земли имеют кратерные озера. Часть из них - пресные (нейтральные). Они формируются за счет атмосферной влаги в неактивных кратерах как действующих, так и потухших вулканов. Другая часть озер – это кислые термальные в той или иной степени минерализованные. Они образуются в активных кратерах действующих вулканов. Источником воды, тепла и растворенных компонентов в таких озерах являются атмосферные осадки, внутрикратерные термальные источники и субаквальные фумарольные выходы (Pasternak, Varecamp, 1997).

То есть, возникновение и существование вулканических озер определяется балансом глубинных флюидов и конвективного вулканического тепла, поступающих из недр вулканов, и атмосферными (вадозными) водами, скапливающимися в котловинах изолированных вулканических кратеров. Для таких кратерноозерных водных масс характерны самые различные и специфические, отличающиеся от других типов озер, физико-химические и гидрологические процессы, последние из которых контролируются внешними атмосферными условиями, строением (морфологией) озерной чаши и восходящими со дна разномасштабными газогидротермальными струями (грифонами).

Объект исследований

Вулкан Горелый относится к III-му гидрологическому типу обводненных активных вулканов по классификации Г.М. Гавриленко (2004) и входит в южную часть Восточного вулканического пояса Камчатки. Расположен он в 75 км к югу от г. Петропавловска-Камчатского и в 12 км к северо-западу от в. Мутновский. Постройка вулкана представляет собой хребет, сформированный из нескольких перекрывающих друг друга конусов и большого количества моногенных шлаковых построек побочных прорывов (рис. 1).



Рис 1. Общий вид на хребет вулкана Горелый с востока (лето 2008 г.). Над центральным активным кратером виден небольшой паро-газовый выброс с поверхности термального озера. Фото Г.М. Гавриленко.

На вершине вулкана имеется четыре крупных кратера, внутри которых располагается ряд мелких гнездообразных кратеров (Селянгин, Пономарева, 1999). Максимальная высота вулкана - 1829 м (рис. 2).

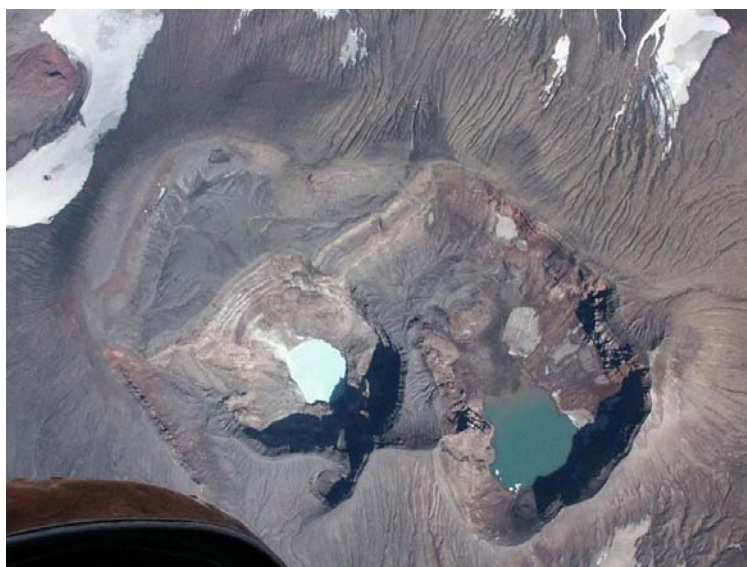


Рис 2. Плановый аэрофотоснимок трех западных кратеров вулкана Горелый. В центре - активный кратер с кислым термальным озером. Фото А.Ю. Озерова.

За исторический период в Горелый извергался не менее 10 раз. Последние его извержения происходили в начале и середине 1980-х годов и характеризовались фреатомагматической деятельностью с выбросом пара и пироклаستيку на высоту от сотен

до 5000 м. Как извержения, так и интенсивная фумарольная деятельность в межпараксизмальные периоды, приурочены к центральному кратеру вулкана, где расположено в настоящее время кислое термальное озеро (Иванов и др., 1988; Мелекесцев и др., 1987).

По состоянию на первую половину 1990-х годов озеро располагалось и располагается в настоящее время в центральном активном кратере вулкана, имеющем «телескопическое» строение. Размеры озера в начале 1990 г. составляли ~ 70 м (рис. 3). Занимало оно дно воронкообразного «колодца» с практически отвесными стенками высотой до 100 м (Егоров и др., 1998). Сложенные рыхлым слоистым пирокластическим материалом стенки «колодца» постоянно осыпались. В бортах «колодца» и у уреза воды наблюдались многочисленные выходы фумарольных струй, формирующие в некоторых местах серные и сульфатные постройки высотой до 2 м. Глубина озера в те годы, впрочем как и сейчас, не установлена. Но, принимая во внимание форму «колодца», крутизну его стенок и свидетельства очевидцев, можно предполагать, что глубина озера составляла и составляет первые десятки метров.



Рис 3. Термальное озеро в активном кратере. Лето 1995 г. Фото М.Г. Гавриленко.

К сожалению, исследования, проводимые на вулкане многие годы, касались, главным образом, изучения строения его постройки, истории развития и описанию конкретных извержений и их продуктов. Об озерах вулкана и, в частности, о кислое озеро в центральном активном кратере можно встретить лишь отрывочные сведения, по которым можно судить, что оно существовало в 1960, 1978, 1979, 1980 и 1984 гг. (Кирсанов, Озеров, 1983) 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 1000°C (рис. 4) (Иванов и др., 1988).

Кислое термальное озеро в Горелый последний раз образовалось и существует поныне, после извержения 1985-1986 гг. Возникло оно, вероятно, в конце 1980-х - начале 1990-х гг. (Gavrilenko et al., 1996). С этого же времени объем вод в озере стал постоянно увеличиваться. Соответственно, стал повышаться уровень озера и площадь его поверхности.



Рис. 4. Жерло в активном кратере вулкана Горелый в спокойный период эксплозивной фазы его деятельности (1986 г.). Фото А.В. Мушинского.

Уровень озера за период наблюдений (1992-2008 гг.) повысился более, чем на 50 м, а площадь его поверхности увеличилась в 10 раз (рис. 5, 6, 7, 8, 9, 10) (Melnikov et al., 2008). Причем наибольший скачек в увеличении площади озера пришелся на период 2004-2008 гг. Это объясняется тем, что до 2004 г. озеро заполняло узкую глубокую колодеобразную воронку диаметром 50-80 м, а затем началось затопление днища более широкой и пологой части кратера (рис. 3). В любом случае, совершенно очевидно, что объем водных масс озера за период наблюдений вырос в несколько раз.



Рис. 5. Современное состояние озера. Январь 2008 г. Фото Г.М. Гавриленко.

Методы исследований

Чаще всего за озером велись визуальные и/или аэровизуальные наблюдения. А начиная с 2000 г. стали проводиться также и спутниковые наблюдения, что дало возможность отслеживать, в первую очередь, изменения площади поверхности озера. Полученная

спутниковая информация по возможности заверялась (контролировалась) во время полевых работ на вулкане (Мельников, Гавриленко, 2008; Melnikov et al., 2008).

Несмотря на сложность и опасность спуска к озеру в 1996, 2000 и 2001 гг., все же удалось отобрать пробы воды непосредственно из озера и измерить их температуру (Гавриленко, Гавриленко, 2005; Егоров и др., 1998; Okrugin et al., 2001).



Рис. 6. Активный кратер в. Горелый с озером в июле 2007 г. Фото Г.М. Гавриленко.



Рис. 7. Сильно загазованный активный кратер в. Горелый с озером в июле 2008 г. Фото Г.М. Гавриленко.

В 2008 г. возможности спуска к озеру не было, поскольку не было специалистов с альпинистской подготовкой. К тому же в активном кратере постоянно происходили камнепады и обвалы рыхлой пирокластики. В связи со сложившейся ситуацией для безопасного пробоотбора озерных вод нами был разработан и осуществлен следующий нестандартный метод.

Над озером в южном секторе кратера был навешен (протянут) капроновый несущий (основной) шнур длиной ~550 м. Один конец этого шнура был закреплен гипсометрически выше другого, т.е. шнур имел некоторый наклон. В верхней точке на шнур был закреплен карабин с блоком. К карабину был привязан оттяжной,

вспомогательный шнур длиной 200 м. Через блок был пропущен еще один (третий) шнур ~300 м с пробоотборником на конце.



Рис. 8. Термальное озеро в конце июля 2008 г. На всей поверхности озера видны поднимающиеся в атмосферу паро-газовые струи и плавающие разводы и пятна коллоидной серы. В правом нижнем углу четко виден подводный грифон. Фото Г.М. Гавриленко.



Рис. 9. Аэрофотоснимок термального озера в ноябре 2008 г. Состояние озера очень похоже на состояние его летом этого же года. Фото А.В. Сокоренко.

С помощью оттяжного шнура карабин с блоком и пробоотборником вытягивался по основному шнуру в такое положение, чтобы пробоотборник находился (нависал) над поверхностью озера. После этого шнур, к которому привязан пробоотборник, стравливался (выпускался) до погружения последнего в озеро. После заполнения пробоотборника водой он вытаскивался в порядке обратном вышеописанной схемы.

Этим методом мы смогли отобрать в летнее время с интервалом в 40 дней две пробы озерной воды, которые были доставлены в институт. В лабораторных условиях был проведен их химический анализ.

Предварительные результаты

Данные химических анализов кратерноозерных вод за разные годы, в том числе и за 2008 г. приведены в таблице. По своим основным характеристикам вода в озере в Горелый идентична водам кислых кратерных озер других активных вулканов мира. А именно, температура воды в озере за годы наблюдений составляла $\sim 40 \pm 3.5$ °С, имела высокую кислотность ($\text{pH} \leq 1$) и большую минерализацию (от >20 до ~ 40 г/л). Также

озерная вода содержит значительное количество коллоидной элементарной серы, что придает ей ярко-бирюзовый цвет, характерный для всех, без исключения, кислых вулканических озер.

Данная статья не преследует цель максимально полно проанализировать и обсудить имеющиеся и полученные в 2008 г. данные, поскольку материал совсем «свежий», естественно, пока еще недостаточно проанализированный и осмысленный. И одной из главных причин, об этом говорилось выше, является резкое изменение гидрологического режима озера в 2004 г., когда узкая колодеобразная воронка диаметром 50-80 м полностью заполнилась термальными водами, и они стали заливать днище более широкой и пологой части кратера.

На данный момент мы смогли предварительно оценить температуру глубинных растворов, поступающих со дна кратера в водную толщу, и теплоотдачу с поверхности озера. Если исходить из предположения, что состав кратерноозерных вод является интегральным составом субаквальных гидротерм, то используя Na/K – геотермометр В.Ф. Гиггенбаха (Giggenbach, 1988) можно определить, что температура глубинных растворов составляет в среднем ~340 °С (таблица). А теплоотдача (тепловая мощность) с поверхности озера в 2008 г. оценена нами по формуле В.Ф. Гиггенбаха и Р.Б. Гловера (Giggenbach, Glover, 1975) приблизительно в 30 МВт.

Таблица. Химические составы кратерноозерных вод в разные годы для кислого термального озера вулкана Горелый

год	1996	2000	2001	2008а	2008б
Т °С	37	42	44.5	~40	~40
pH	1.13	0.70	0.70	0.79	0.69
H ⁺	88.0	217.4	217.4	170.1	214.2
NH ⁴⁺	3.0	<0.1	<0.1	0.3	0.2
Na ⁺	460.0	450	496	329.2	359.5
K ⁺	77.0	174	198	121.0	121.0
Ca ²⁺	561.1	620	703	689.4	545.1
Mg ²⁺	778.2	508	782	544.5	486.1
Fe ²⁺	1334.8	1216	1295	3360.5	3500.1
Fe ³⁺	240.2	88	376	3.5	60.0
Al ³⁺	243.0	912	1118	1087.8	1219.6
Σкат.	3697.3	3968	4968	6307.2	6531.1
Cl ⁻	3354.8	6812	7103	5672.5	6027.0
SO ₄ ²⁻	5759.8	5196	6520	6205.5	5724.2
HSO ₄ ⁻	8906.2	12018	14955	11978.4	13629.6
SO ₃ ²⁻	252.3	-	-	-	-
S ₄ O ₆ ²⁻	476.0	4569	5566	2805.6	5379.4
F ⁻	151.2	423	432	203.2	221.1
Σанион.	18900.3	29018	34576	26865.2	30981.3
H ₄ SiO ₄ р-р	-	544	630	60.0 общ.	55.0 общ.
H ₄ SiO ₄ колл	-	238	348	-	-
H ₃ BO ₃	-	<0.5	<0.5	10.4	11.8
М, г/л	22.6	33.8	39.5	33.3	34.4
Fe/Al	6.48	1.43	1.49	3.09	2.92
T ⁰ С _{К-Na}	277	331	373	363	352

Визуальные и аэровизуальные наблюдения за субэзальной и субаквальной деятельностью в период 1992-2008 гг. показали, что активность в озере ежегодно наращается. Не спадает она и в настоящее время, о чем свидетельствуют данные фотосъемки июля 2007 г. и июля 2008 г. (рис. 6 и 7), фотосъемки 16 января 2008 г., 28 июля 2008 г. и аэрофотосъемки 12 ноября 2008 г. (рис. 5, 8, 9).

Если учитывать наш опыт по изучению бессточного термального озера в. Малый Семячик и аналогичные данные по другим кратерным озерам, то совершенно очевидно постоянное увеличение активности в центральном кратере в. Горелый. Кроме того, помимо субэзальных фумарольных выходов по периметру озера и на внутренних стенках кратера, вмещающего его, в центральной части озера уже в июле 2007 г. впервые наблюдались четко оконтуренные и отличающиеся по цвету неподвижные пятна диаметром ~15-25 м, очевидно являющиеся проекциями на поверхность озера восходящих с его дна газогидротермальных струй (грифонов) (рис 10). Эти пятна были оконтурены ярко-желтыми ореолами флотационной коллоидной серы. Схожая ситуация (хотя и более контрастная) наблюдалась в период активизации в кратерном озере в. Малый Семячик в 1986 г. (Гавриленко и др., 1993).



Рис. 10. Поверхность озера летом 2007 г. Фото А.В. Сокоренко.

Последние два года над центральным (активным) кратером в. Горелый стали периодически наблюдаться парогазовые облака. Поэтому в начале 2008 г. (17 января) было произведено обследование кратера. Наблюдения показали, что стенки кратера и осыпи вокруг озера были покрыты снегом, на котором четко проступали термальные и фумарольные площадки. В средней части южной стенки кратера наблюдались необычные «трубы-отдушины» (рис. 5). Линейно расположенные термальные площадки и небольшие фумаролы под восточной и северной стенками кратера четко фиксировали контакт между стенкой кратера и проседающим блоком рыхлых осыпных вулканокластических пород. Уровень воды в озере стал выше, чем летом 2007 г. Крупные фумаролы в западной и северо-западных частях кратера вырывались со значительной скоростью в атмосферу прямо у самого уреза воды, а некоторые - из-под воды. Эта же картина характерна и для состояния кратера в ноябре 2008 г. (рис. 9).

В 2008 г. озеро обследовалось нами четыре раза. И каждый раз на кромке активного кратера помимо сернистых ощущался резкий запах галоидных газов (главным образом, HCl), что косвенно указывало на увеличение температуры фумарол, поступающих в атмосферу. Причем ситуация на озере в 2008 г. в периоды его посещения с каждым разом заметно менялась. Это выражалось в том, что водные массы озера становились все более подвижными, а паро-газовые выделения с поверхности озера - все более интенсивным. К тому же летом и осенью в юго-западной части озера наблюдался мощный подводный грифон (рис. 8), который оказался по данным тепловой аэросъемки В.А. Дрознина и И.К. Дубровской (выполненной в 2008 г.) не единственным вдоль всего западного берега озера.

Как уже отмечалось, несмотря на сложность спуска к озеру, нам все-таки удалось дважды отобрать пробы кратерноозерных вод (в конце июля и начале сентября). Это была четвертая и пятая удачные попытки опробования вод озера за все время его существования после последнего извержения (~20 лет назад). Температура воды на поверхности была порядка 40⁰С, что практически совпадает с данными дистанционной тепловой съемки В.А. Дрознина и И.К. Дубровской.

Хотя пробы воды отбирались и ранее, в предыдущие годы, наше двойное опробование с интервалом в 40 дней без сомнений является более информативным, поскольку дает возможность составить представление не просто о составе воды, но и судить о динамике субаквальных процессов в активном кратере за сравнительно короткий промежуток времени при фактически одинаковых внешних (погодных) условиях (лето).

Так, например, из таблицы видно, что за 40 дней рН кратерноозерных вод понизилась на 0.1, а содержания ряда макрокомпонентов и общая минерализация воды увеличились на 6 -1%, а для борной кислоты - на 13.5%.

Несмотря на то, что температура озера мало отличается от температур предыдущих лет, мы вправе судить, что конвективный тепловой поток возрос, поскольку водная масса озера увеличилась в несколько раз, а площадь его поверхности увеличилась на порядок, что повлекло за собой значительное увеличение теплопотерь со значительно большей поверхности озера.

Важно отметить и то, что в районе вулкана ежедневно практически уже более года фиксируется повышенный фон непрерывного вулканического спазматического дрожания. То есть мы можем предполагать на основе имеющегося у нас комплекса данных, что в среднесрочной перспективе на в. Горелый может произойти извержение.

Выводы

1. Активный в. Горелый, представляющий собой вулканический хребет, в вершинной части имеет четыре крупных кратера, в трех из которых имеются озера. И только один - центральный активный кратер - вмещает кислое термальное озеро.

2. За последние полвека кислое термальное озеро в центральном кратере в. Горелый неоднократно исчезало и вновь возникало. Очевидно, этот процесс происходил и на более ранних этапах деятельности вулкана.

3. Исчезновение озера происходило перед началом извержений вулкана, предшествуя им. Так, например, было в 1980 и 1984 гг.

4. После окончания эксплозивных извержений 1980-х гг. в центральном действующем кратере вулкана вновь возникло термальное озеро, активность которого из года в год увеличивается. Причем максимум усиления субаэральной и субаквальной деятельности в кратере отмечен в последние годы: 2007-2008 гг.

5. В результате ежегодного мониторинга за состоянием озера в период с 1992 по 2008 гг. с применением самых разнообразных методов мы вправе считать, что в среднесрочной перспективе может произойти извержение вулкана, как это было в начале 1980-х гг. Поэтому упустить уникальную возможность, а именно - фазу перехода активной деятельности в озере к извержению - недопустимо.

Работы проводились при финансовой поддержке РФФИ (проект № 06-05-96002) и ДВО РАН (проект № 07-III-Д-08-092).

Список литературы

Гавриленко Г.М. Активные вулканы современных островных дуг: гидролого-гидрохимический аспект исследований // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 49-64.

Гавриленко Г.М., Гавриленко П.Г. Кислое кратерное озеро вулкана Горелого (Камчатка) // Вопросы географии Камчатки. 2005. № 11. С. 56-57.

Гавриленко Г.М., Двигало В.Н., Фазлуллин С.М., Иванов В.В. Современное состояние вулкана Малый Семячик (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1993. № 2. С. 37.

Егоров Ю.О., Гавриленко Г.М., Осипенко А.Б. и др. Состояние кислого озера в кратере вулкана Горелый, Камчатка летом 1996 года // Вулканология и сейсмология 1998. № 6. С. 100-106.

Иванов Б.В., Дроздин В.А., Вакин Е.А. и др. Извержение вулкана Горелый в 1985 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 93-98.

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.

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 тефрохронологических исследований) // Вулканология и сейсмология. 1987. № 3. С. 3-18.

Мельников Д.В., Гавриленко Г.М. Применение аэрокосмических методов исследований для задач вулканологии (на примере Мутновского и Горелого вулканов, Камчатка) // Шестая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», М., ИКИР РАН, 10-14 ноября 2008. С. 231.

Первухин М.А. О генетической классификации озерных ванн // Землеведение. 1937. Т. 39, С. 526-537.

Селянгин О.Б., Пономарева В.В. Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная Камчатка // Вулканология и сейсмология. 1999. № 2. С. 3-23.

Gavrilenko G.M., Osipenko A.B., Egorov Yu.O. Lake-phantom in the crater of the Gorely volcano, South Kamchatka // Current Research on Volcanic Lakes. Newsletter of the IAVCEI Commission on Volcanic Lakes, 1996. № 9. P. 9-10.

Giggenbach W.F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na – K – Mg geoindicators // Geochim. Et cosmochim. Acta. 1988. V. 52. № 12. P. 2749-2765.

Giggenbach W.F., Glover R.B. The use of chemical indicators in the surveillance of volcanic activity affecting the Crater Lake on Mt Ruapehu, New Zealand // Bull. of Volcanology. 1975. V. 39. P. 70-81.

Melnikov D.V., Gavrilenko G.M., Ovsianikov A.A. Conditions of the thermal acid lake of the active crater of Gorely volcano (Kamchatka, Russia) as a medium-term precursors of its next eruption // IAVCEI. General Assembly 2008. Reykjavik, Iceland. P. 90.

Okrugin V.M., Zelenskii M. E., Sergeeva S.V. et al. Last news about volcanic activity in Kamchatka peninsula: Mutnovsky and Gorely volcanoes especially // Bull. of Research Center for North Eurasia and North Pacific Regions, Hokkaido University, 2001. V. 1. P. 146-163.

Pasternack G.B., Varecamp J.C. Volcanic lake systematics I. Physical constraints // Bull. of Volcanology. 1997. Vol. 58. № 7. P. 528-538.