

УДК 551.215.6

КОСВЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ХЛОРИД-ИОНА ВО ФЛЮИДАХ, ПОСТУПАЮЩИХ СО ДНА КРАТЕРНОГО ОЗЕРА ВУЛКАНА МАЛЫЙ СЕМЯЧИК (КАМЧАТКА)

© 2004 г. Г. М. Гавриленко

Институт вулканологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 25.12.2002 г.

Приводится метод непрямого расчетного определения хлорид-иона в вулканогенных флюидах (глубинных газогидротермальных растворах), поступающих в воды кратерных озер с их дна, где практически невозможно проведение отбора проб *in situ* из субаквальных газогидротермальных выходов. Метод основывается на ряде теоретических предпосылок, а также на предложенной автором в 2000 г. гидрологической модели бессточных кратерных озер. Этот метод по своему подходу схож с методом В.Ф. Гиггенбаха и Р.Б. Гловера (1975), однако является более строгим, поскольку учитывает ряд дополнительных характеристик (свойств) исследуемых объектов (кратерных озер), например, такой, как скрытый сток. Расчеты по предложенной методике проведены автором на примере оз. Троицкого, занимающего активный кратер вулкана Малый Семячик, с использованием конкретных численных данных натурных наблюдений за этим озером в течение нескольких десятков лет.

Формы проявления современного вулканизма на нашей планете весьма разнообразны вследствие огромного различия условий, в которых вулканическая активность реализуется на земной поверхности. Среди многообразия обводненных активных вулканических сооружений с различными гидрологическими режимами особое место занимают вулканы, в активных кратерах которых существуют сравнительно продолжительные промежутки времени кислые термальные озера [4].

В предлагаемой статье приводятся результаты исследований на одном из наиболее типичных представителей кратерных озер – оз. Троицкого, расположенного в активном кратере вулкана Малый Семячик [1].

Малый Семячик – это современный активный вулкан, расположенный в Восточном хребте Камчатки ($57^{\circ}07'$ с.ш. и $159^{\circ}53'$ в.д.). Находится он в 20 км от берега Тихого океана, а его максимальная высота составляет 1560 м над уровнем моря.

Постройка вулкана представляет собой вулканический хребет протяженностью 3 км, образованный тремя тесно сближенными, последовательно формировавшимися конусами-стратовулканами. Самый молодой конус сложен гиперстеновыми базальтами и андезито-базальтами. Действующая юго-западная часть этой постройки имеет вершинный активный кратер (Троицкого), который образовался в результате крупного взрыва около 400 лет назад и принял окончательную, современную форму в результате последующих обрушений

стенок воронки. Извержения вулкана отмечались в 1804, 1851–1852, 1945–1946 и 1952 гг. [10].

В настоящее время активный кратер вулкана занят кислым термальным озером округлой формы, имеющим диаметр порядка 500–600 м и площадь более 200000 м² (рис. 1). Максимальные глубины озера, замеренные в разные годы, различны: от 117 до 140 м, а по косвенным, расчетным данным глубина озера могла превышать 150 м (см. ниже). Такое непостоянство глубин озера, очевидно, свидетельствует о непостоянстве его уровня, что является, в свою очередь, следствием непостоянства объема кратерноозерных вод [6, 9]. Прямая связь объема водных масс, уровня озера и его глубины вполне закономерна, поскольку основные морфометрические параметры озера (форма дна кратера Троицкого) со времени его открытия и по настоящее время кардинально не менялись.

Если действительно рельеф дна кратера за последние десятилетия значительно не менялся (по крайней мере, нет фактов, свидетельствующих об обратном), то абсолютная отметка наиболее пониженной его части (или максимальной глубины кратерного озера) составляет ~1050 м над уровнем моря, т.е. по косвенным данным В.И. Влодавца и его коллег [1] во время первого посещения озера в 1946 г. глубина его была по расчетам автора порядка 154 м.

Помимо установленных за время наблюдений с конца 1960-х гг. временных вариаций гидрологических параметров оз. Троицкого также были установлены значительные изменения его гидро-

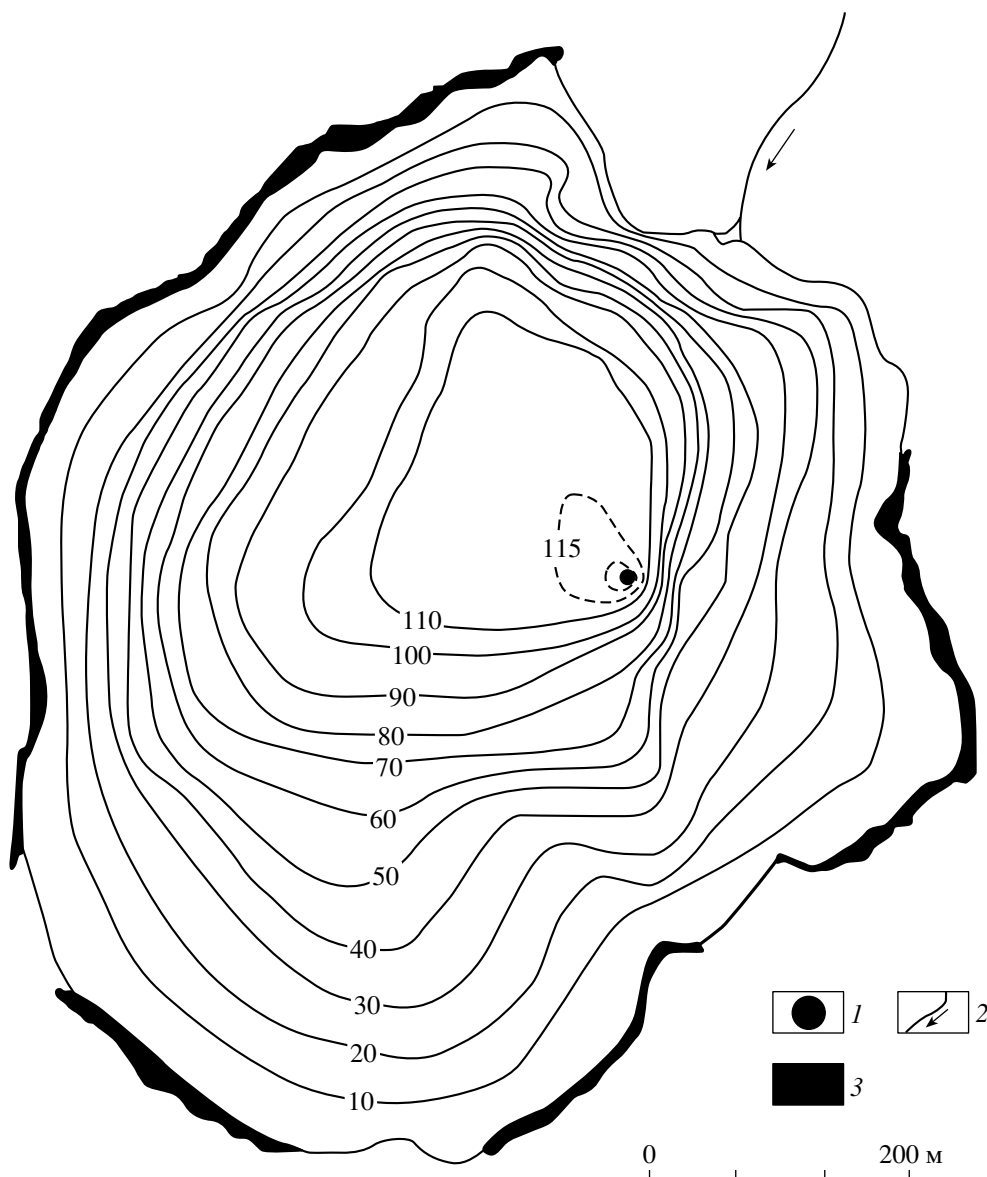


Рис. 1. Батиметрическая карта-схема бессточного кратерного оз. Троицкого (вулкан Малый Семячик). 1 – местоположение максимальной глубины озера в 1992 г. (117 м) и основной зоны разгрузки эндогенных флюидов; 2 – пресный ручей, стекающий в озеро; 3 – скальные обрывы в кратере Троицкого.

химических и тепловых характеристик. Об этом свидетельствуют данные по изучению озера рядом исследователей и автора в период с 1965 по 2003 г. (рис. 2) [6, 8, 11].

Гидрологическая модель оз. Троицкого. Важным этапом в изучении того или иного природного объекта является построение его модели, являющейся эффективным инструментом в исследованиях, конечная цель которых - прогноз свойств этого объекта. С этой целью автором первоначально была построена гидрологическая модель оз. Троицкого [3].

Данные по кратерным озерам активных вулканов Мира свидетельствуют о значительных из-

менениях их уровней, не являющихся сезонными. Установлены были такие изменения и для бессточного кратерного озера вулкана Малый Семячик. Причина колебаний уровня этого озера была установлена с помощью анализа уравнений его водного и теплового балансов и наглядно было показано на предложенной автором в 2000 г. гидрологической модели озера [3]. Из свойств этой модели следует, чем больше тепловая мощность вулкана, а также больше время длится активная фаза, тем достигается и наибольший объем озерных вод, соответственно, более высокий их уровень. Это связано с тем, что в активную фазу увеличение объема озера идет за счет разностей ско-

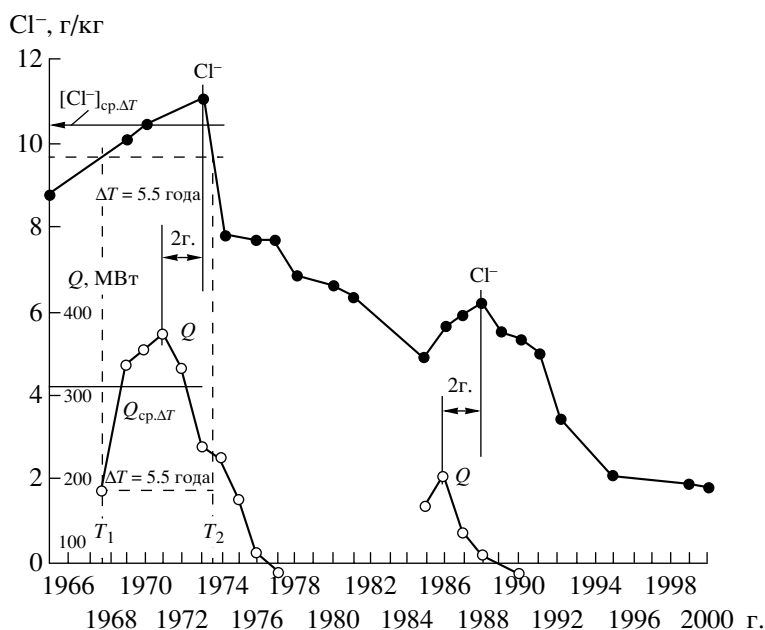


Рис. 2. Временные вариации тепловой мощности (Q , МВт) вулкан Малый Семячик и концентраций хлорид-иона (Cl^- , г/кг) в водах кратерного оз. Троицкого. $Q_{\text{ср}}$, T – средняя тепловая мощность за период 5.5 г.; $[\text{Cl}^-]_{\text{ср}}$, T – средняя концентрация хлорид-иона за 5.5 г.

ростей поступления воды с глубинным флюидом и испарением, которое менее интенсивно в среднем на 1/2 (от 1/3 до 2/3) [3].

Действительно, в 1946 г., когда мощность вулкана Малый Семячик превышала по косвенным данным 1000 МВт, глубина озера была ~154 м, а в результате прямых измерений теплоотдачи с поверхности озера в период активизации вулкана в начале 1970-х годах (375 МВт) глубина озера была 140 м [8], а в середине 1980-х гг. при мощности 200 МВт, наибольшая глубина озера была уже 132 м [6, 9]. Когда активность в озере практически полностью прекратилась (1992 г.), измеренная глубина стала еще меньше – 117 м (таблица).

Из свойств гидрологической модели оз. Троицкого также хорошо видна зависимость некоторых элементов водного баланса с морфометрическими параметрами озера (глубиной, объемом озера и площадью его дна). Рассмотрение геометрического аналога этого озера позволило установить возможные количественные связи между этими параметрами. С ростом объема водных масс озера, увеличивается площадь дна и повышается его уровень. Причем изменение этих параметров происходит неравномерно, приблизительно в соотношении 7:4:2.5, соответственно. А поскольку, по закону А. Дарси с увеличением площади дна возрастает скорость фильтрации озерных вод, т.е. скрытый сток, то его возрастание с повышением уровня озера находится в отношении 4 к 2.5 [3].

Все рассмотренные выше построения не учитывают существующих сезонных вариаций уров-

ня (объема водных масс) озера. Учет этого фактора показал, что для кратерного озера вулкана Малый Семячик, у которого периоды активизации имеют значительно большую временную

Соотношение основных параметров, характеризующих состояние кратерного озера Троицкого при различной степени активности вулкана Малый Семячик (Камчатка)

ФАЗА →	I	II	III	IV
ПАРАМ. ↓	1946 г.	1971 г.	1986 г.	1991–1992 гг.
Q , МВт	а	$375 \pm 15\%$	$201 \pm 15\%$	–
	б ~1100*	374	207	<100
T , °С	а	66	42	31
	б	–	–	–
H , м	а	–	140	132
	б	~154	–	–
$V_{\text{оз}}$, $n \times 10^6 \text{ м}^3$	а	–	15	–
	б	~19	–	~10.7
$\Delta V_{\text{оз}}$, л/с	а	–	± 0	+13
	б	–	–	–30
$P_{\text{дрен}}$, л/с	а	–	162	130
	б	–	165	133
				≤ 130

Примечание. Q – тепловая мощность вулкана (* – по формуле [12] для кратерного оз. Руапеху, схожего практически по всем характеристикам с оз. Троицкого); H – максимальная глубина озера; $V_{\text{оз}}$ – объем озера; $\Delta V_{\text{оз}}$ – скорость увеличения объема озера; $P_{\text{дрен}}$ – скрытая разгрузка озера. а – измеренные параметры, б – параметры, полученные расчетом. I–IV – фазы активности вулкана (см. текст).

экспозицию (несколько лет), чем полугодовые сезонные процессы, результирующим эффектом повышения уровня озера являются эндогенные процессы, т.е. интенсивность поступления воды в составе субаквальных газогидротермальных растворов. Например, в течение 5 лет при мощности вулкана 200–400 МВт уровень озера повысится на 15–20 м при сезонных вариациях $\pm(2-3)$ м [3].

Вариации тепловых и гидрохимических параметров озера и определение хлоридности флюида, поступающего с его дна в водную толщу. Исследователям давно известна зависимость между изменениями химического состава кратерных озер и их тепловой мощностью [8, 11–13]. Более того, этот факт использовался вулканологами для количественных оценок ряда параметров, характеризующих состояние кратерных озер в различные фазы активности вулканов. В частности, В.Ф. Гиггенбах и Р.Б. Гловер [12] по своей методике, основанной на взаимозависимости между увеличением хлорид-иона в водах оз. Руапеху и тепловой мощностью в период активизации одноименного вулкана в 1972–1973 гг., рассчитали, что содержание в теплоносителе Cl-иона составляло в этот промежуток времени приблизительно 12 г/кг [12].

Эти авторы использовали для своих расчетов интегральные значения гидрохимических и тепловых параметров для сравнительно протяженного отрезка времени (1972–1973 гг.), поскольку изменения исследованных характеристик, хотя и взаимосвязаны, но отнюдь не являются адекватными в какой-то определенной, незначительный промежуток времени. И действительно, при внимательном рассмотрении совмещенных графиков вариаций этих параметров хорошо заметна асинхронность в их изменениях, а именно запаздывание гидрохимических характеристик по отношению к тепловым (см. рис. 2 и [12]).

Первыми из отечественных исследователей обратили на этот факт внимание А.П. Горшков с коллегами [8], объяснив это на конкретном примере – кратерном озере вулкана Малый Семячик. Ими было отмечено, что причиной запаздывания гидрохимических характеристик исследованного бессточного озера является его “буферная” емкость (масса озера) [8].

Как было установлено, измеряемый на поверхности термального озера тепловой поток обусловлен поступлением глубинного теплоносителя (эндогенного флюида). Если теплотери через стенки кратера пренебрежительно малы, то уравнение теплового баланса может быть записано в виде:

$$Q_1 - Q = cm(dt/d\tau) \quad (1)$$

где Q_1 и Q – входящий и выходящий тепловые потоки, c – теплоемкость воды, m – масса и t – температура озерных вод, τ – время.

При начальных условиях ($\tau = 0$) $Q_1 = Q_0$, а затем сразу, в это же время (в момент активизации в активном кратере вулкана), входящий тепловой поток скачкообразно изменится от Q_0 до Q_1 . Теплоотдача на поверхности озера осуществляется конвективным способом:

$$Q = \alpha(t - t_b) \quad (2)$$

где: α – коэффициент теплоотдачи, t_b – температура воздуха у поверхности озера. Учитывая, что $dt = dQ/\alpha$, можно преобразовать уравнение (1) к виду:

$$dQ/(Q - Q_1) = -(\alpha/cm)d\tau \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (3), получаем:

$$(Q - Q_1)/(Q_0 - Q_1) = e^{-(\alpha/cm)\tau} \quad (4)$$

Аналогичным образом можно показать, что выражение для изменений во времени химического состава воды кратерного озера имеет вид:

$$(C - C_1)/(C_0 - C_1) = e^{-(P_{дрен}/m)\tau} \quad (5)$$

где: C – текущая концентрация химических элементов в воде озера, C_0 и C_1 – пределы изменения гидрохимических параметров ($C_0 \leq C \leq C_1$), $P_{дрен}$ – скрытая разгрузка озерных вод, m – масса вод озера.

Как видно, уравнения (4) и (6) имеют одинаковый вид, однако показатели экспоненты отличаются. При подстановке конкретных численных выражений в эти уравнения, в частности для оз. Троицкого, показатель степени в уравнении (4) более чем в 20 раз превышает показатель в уравнении (6).

Итак, А.П. Горшков с соавторами [8] наглядно показали, что тепловая инерция бессточного термального озера, обусловленная соотношением теплозапаса водных масс и тепловой мощностью вулкана, значительно меньше, чем инерция химического состава кратерноозерных вод вследствие значительно их объема и сравнительно малой величины скрытой разгрузки. Вследствие этого химический состав вод озера значительно медленнее приходит к новому равновесию после изменения режима питания его эндогенным флюидом при изменениях активности вулкана. Для кратерного озера вулкана Малый Семячик инерция или время задержки гидрохимических параметров составляет приблизительно два года (см. рис. 2).

Предлагаемый ниже автором метод расчета концентраций хлорид-иона в глубинном флюиде, поступающем в воды оз. Троицкого, учитывает эту особенность термальных озер, так же как это учитывали для оз. Руапеху авторы [12]. Однако, предлагаемый в данной работе метод отличается от предшествующего, прежде всего, тем, что в нем учитывается помимо основных характерис-

тик кратерного озера и такой важный параметр, как скрытый сток ($P_{\text{дрен}}$).

Воспользуемся для начала при наших расчетах следующим соотношением:

$$m_{\text{флю}} i \approx \Sigma Q_{\text{потер}} \quad (6)$$

где $m_{\text{флю}}$ – интенсивность поступления в озеро флюида с теплосодержанием, $i \approx 2.8$ МДж/кг [2] и неизвестной (искомой) концентрацией хлорид-иона ($[Cl^-]_{\text{флю}}$ г/кг), а $\Sigma Q_{\text{потер}}$ – измеренная на озере тепловая мощность вулкана.

Однако, как отмечено выше, изменения химического состава вод кратерных озер неадекватны изменениям тепловой мощности вулканов. Иными словами, нельзя в одно и то же время, сопоставлять гидрохимические и тепловые параметры. Более корректно сопоставлять их интегральные значения для сколько-нибудь протяженных периодов времени, охватывающих начало и окончание активных фаз, т.е. содержащие оба максимума: по тепловой мощности и химическому составу.

Для этого воспользуемся данными, полученными для кратерного озера вулкана Малый Семячик в период с конца 1960-х до середины 1970-х годов [8, 11] (рис. 2).

За время ΔT (с) в период активизации вулкана в озеро поступило следующее количество хлорид-иона:

$$\Sigma_+ Cl^- (\text{г}) = m_{\text{флю}} [Cl^-]_{\text{флю}} \Delta T \quad (7)$$

Подставим сюда из уравнения (6) $m_{\text{флю}} \approx \Sigma Q_{\text{потер}} / i$, где $i = 2.8$ МДж/кг, а $\Sigma Q_{\text{потер}} \approx Q_{\text{ср}}$ – средняя тепловая мощность за время ΔT , т.е. уравнение (7) примет следующий вид:

$$\Sigma_+ Cl^- (\text{г}) = (Q_{\text{ср}} / i) [Cl^-]_{\text{флю}} \Delta T \quad (8)$$

За этот же период времени из озера было вынесено со скрытым стоком следующие содержания хлорид-иона:

$$\Sigma_- Cl^- (\text{г}) = P_{\text{дрен}} [Cl^-]_{\text{ср.оз}} \Delta T \quad (9)$$

где $P_{\text{дрен}}$ – величина скрытого стока из озера и $[Cl^-]_{\text{ср.оз}}$ – средняя концентрация хлорид-иона в водах озера за период времени ΔT .

Примем за начало и конец интервала времени ΔT такие временные отметки T_1 и T_2 , когда количество хлорид-иона в озере были равны, т.е. были равны концентрации этого компонента при постоянстве объема озера (рис. 2). Тогда совершенно очевидно, что в рассматриваемый период времени за счет поступления Cl^- -иона с флюидом содержание его в озере возрастало, увеличивалось соответственно и его концентрация. При этом постоянно шел вынос этого компонента из озера со скрытым стоком. Вначале он был менее интенсивен, чем привнос Cl^- -иона с флюидом, а затем, ког-

да вулканическая активность уменьшилась, стал преобладать. В результате общая масса Cl^- -иона стала уменьшаться, соответственно, начала снижаться его концентрация в озерных водах. В какое-то время T_2 концентрация Cl^- -иона стала равной той, которая была во время T_1 . Это означает, что вся масса привнесенного компонента в озеро с глубинным флюидом за период T была вынесена из него за это же время со скрытым стоком. Соответственно можно приравнять уравнения (8) и (9), т.е. $\Sigma_+ Cl^- = \Sigma_- Cl^-$ или:

$$(Q_{\text{ср}} / i) [Cl^-]_{\text{флю}} \Delta T = P_{\text{дрен}} [Cl^-]_{\text{ср.оз}} \Delta T,$$

откуда

$$[Cl^-]_{\text{флю}} = ([Cl^-]_{\text{ср.оз}} / Q_{\text{ср}}) i P_{\text{дрен}} \quad (10)$$

Для рассмотренной фазы активизации вулкана Малый Семячик ΔT при вышеотмеченных условиях составляло ~ 5.5 г. (рис. 2). В этот период средняя тепловая мощность составляла 310 МВт, а средняя концентрация хлорид-иона 10.37 г/кг. Уровень и объем озера были в это время приблизительно постоянны, а следовательно и определенный выше скрытый сток (~ 160 кг/с). Подставив эти значения в уравнение (10), находим, что средняя концентрация хлорид-иона в глубинном флюиде в рассматриваемый период времени составляла приблизительно 15 г/кг. Аналогичные выкладки, сделанные автором для периода активизации вулкана в середине 1980-х годов, дали нам приблизительно такое же значение $[Cl^-]_{\text{флю}} = 16$ г/л.

Как было отмечено выше, для кратерного озера в Руапеху рассчитанные концентрации хлорид-иона имели значения того же порядка: 12 г/кг [12].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 02-05-64979) и проекта “Развитие научных школ” (№ 00-15-98609).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влодавец В.И., Морозов А.И., Троицкий В.Д. Вулкан Малый Семячик // Бюл. вулканол. станций. 1948. № 15. С. 17–27.
2. Вукалович М.П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. М.: Энергия, 1965. 399 с.
3. Гавриленко Г.М. Гидрологическая модель кратерного озера вулкана Малый Семячик (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2000. № 6. С. 21–31.
4. Гавриленко Г.М. Активные островодужные вулканы в различных гидрологических обстановках: гидрохимический аспект исследований // II Всероссийский симпозиум по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург, 2003. С. 196–202.
5. Гавриленко Г.М. Гидрохимические исследования активных островодужных вулканов, находящихся в различных гидрологических обстановках // Сб. материалов совещания “Гидрогеология и геохимия

- вод складчатых областей Сибири и Дальнего Востока". Владивосток; Дальнаука, 2003. С. 84–93.
6. Гавриленко Г.М., Двигало В.Н., Фазлуллин С.М., Иванов В.В. Современное состояние вулкана Малый Семьячик (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1993. № 2. С. 3–7.
 7. Горная энциклопедия (Водопроницаемость). М.: Изд-во Сов. энциклопедия. Т.1. 1984. С. 412.
 8. Горшков А.П., Гребзды Э.И., Самойленко Б.И., Слезин Ю.Б. К расчету баланса тепла и массы кратерного озера вулкана Малый Семьячик // Бюл. вулканол. станций. 1975. № 51. С. 50–59.
 9. Двигало В.Н., Андреев В.И., Гавриленко Г.М. и др. Деятельность вулканов Юго-Восточной Камчатки и Северных Курил в 1985–1986 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 13–20.
 10. Селянгин О.Б. Петрогенезис базальт-дацитовый серии в связи с эволюцией вулканоструктур // М.: Наука, 1987. 148 с.
 11. Слезин Ю.Б., Ковалев Г.Н., Гребзды Э.И., Чеглецова Е.А. Об активности вулкана Малый Семьячик // Бюл. вулканол. станций. 1971. № 47. С. 37–39.
 12. 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.
 13. Rowe G.L., Ohsawa S., Takano B. et al. Using crater lake chemistry to predict volcanic activity at Poas Volcano, Costa Rica // Bull. of Volcanology. 1992. V. 54. P. 494–503.

An Indirect Method for Determining Concentrations of Ionic Chloride in Fluids Coming from the Bottom of the Crater Lake on Malyi Semyachik Volcano, Kamchatka

G. M. Gavrilenko

*Institute of Volcanology, Far East Division, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

A method is provided for indirect calculation of ionic chloride in volcanogenic fluids (deep-seated gas-hydrothermal solutions) that come into the water of crater lakes from the lake bottom where it is virtually impossible to sample in situ from subaquatic gas-hydrothermal discharges. The method is based on several theoretical assumptions, as well as on the hydrological model of undrained crater lakes put forward by this author in 2000. The approach is similar to the method of V.F. Giggenbach and R.B. Glover (1975), but is more rigorous, since it incorporates several additional characteristics (properties) of objects under study (crater lakes), e.g., concealed drainage. Calculations based on this method were carried out by the present author for Lake Troitsky which occupies the active crater of Malyi Semyachik Volcano using actual numerical data from field observations of this lake during a few decades.