

УДК 551.215.6:556.552

ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРАТЕРНОГО ОЗЕРА ВУЛКАНА МАЛЫЙ СЕМЯЧИК (КАМЧАТКА)

© 2000 г. Г. М. Гавриленко

Институт вулканологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 05.06.98 г.

Предложена гидрологическая модель бессточного озера в кратере активного вулкана, основывающаяся на фактических данных по кратерному озеру вулкана Малый Семячик. На основе этой модели проведены расчеты ряда параметров, характеризующих состояние кратерного озера в различные фазы деятельности вулкана. Показано, что основным компенсационным процессом в балансе водных масс бессточных кратерных озер во все фазы деятельности вулканов является скрытая (подземная) разгрузка его вод, величина которой находится в прямой зависимости от площади дна озера, соответственно – его объема. Установлено, что сезонные вариации уровня кратерного озера вулкана Малый Семячик в периоды усиления его активности не превышают ± 2 м, что не существенно в сравнении с более значительным повышением уровня вод озера, связанного с поступлением в него дополнительных масс воды в составе глубинного флюида.

Введение. Изучение кратерных озер активных вулканов – одно из важных направлений вулканологии, к тому же весьма специфическое, с точки зрения методики их исследования. Сформированные в активных кратерах вулканов и существующие иногда многие десятилетия эти озера аккумулируют в себе значительную часть глубинных флюидов, отделяющихся от остывающих близповерхностных магматических тел и фильтрующихся через их водную толщу. Однако в силу значительного буферного эффекта водных масс озер эндогенные процессы, протекающие в недрах вулканогидротермальных систем, хотя и адекватно, но с запаздыванием отражаются на их состоянии.

Одним из начальных этапов в изучении любого природного объекта является построение его обобщенной качественной модели, основывающейся на имеющихся фактических данных о нем, на вероятностных оценках некоторых параметров, характеризующих объект, а также на ряде теоретических предпосылок. Основным назначением такой модели является выявление наиболее значимых процессов, определяющих эволюцию объекта, а также выработка рациональной методики его изучения.

Основной целью предлагаемой статьи является разработка качественной гидрологической модели бессточного кратерного озера* вулкана Малый Семячик (оз. Троицкого). Для этого в сравнительном плане анализируется дискретная цепочка разновременных состояний озера, характеризующих

различную степень активности вулкана, что позволяет получить общее представление об эволюции этого озера.

Кроме того, в статье на основе предлагаемой модели, а также имеющихся сравнительно немногочисленных фактических данных, делается попытка установить масштабы и направленность процессов, протекающих в озере и являющихся отражением степени активности вулкана Малый Семячик. Также проводится количественная оценка некоторых параметров, контролирующей гидрологический режим озера в различные фазы активности вулкана.

Вулкан Малый Семячик и его кратерное озеро (Троицкого). Вулкан Малый Семячик – современный активный вулкан, расположенный в Восточном хребте Камчатки в 20 км от берега Тихого океана ($57^{\circ}07'$ с.ш.; $159^{\circ}53'$ в.д.). Максимальная высота 1560 м над уровнем моря.

Постройка вулкана представляет собой вулканический хребет протяженностью 3 км, образованный тремя тесно сближенными, последовательно сформировавшимися конусами-стратовулканами. Последний, самый молодой конус (Кайно-Семячик) сложен в основном гиперстеновыми базальтами и андезито-базальтами. Действующая юго-западная часть этой постройки имеет вершинный активный кратер (оз. Троицкого), который образовался в результате крупного взрыва около 400 лет назад и принял окончательную, современную форму в результате последующих обрушений стенок воронки [12].

Извержения вулкана Малый Семячик отмечались в 1804, 1851–1852, 1945–1946 и 1952 гг. Сведения о них, кроме данных 1945–1946 гг., полученные

* Бессточное озеро – это озеро, не имеющее поверхностного стока. Расход воды из него осуществляется за счет испарения и подземным путем [10].

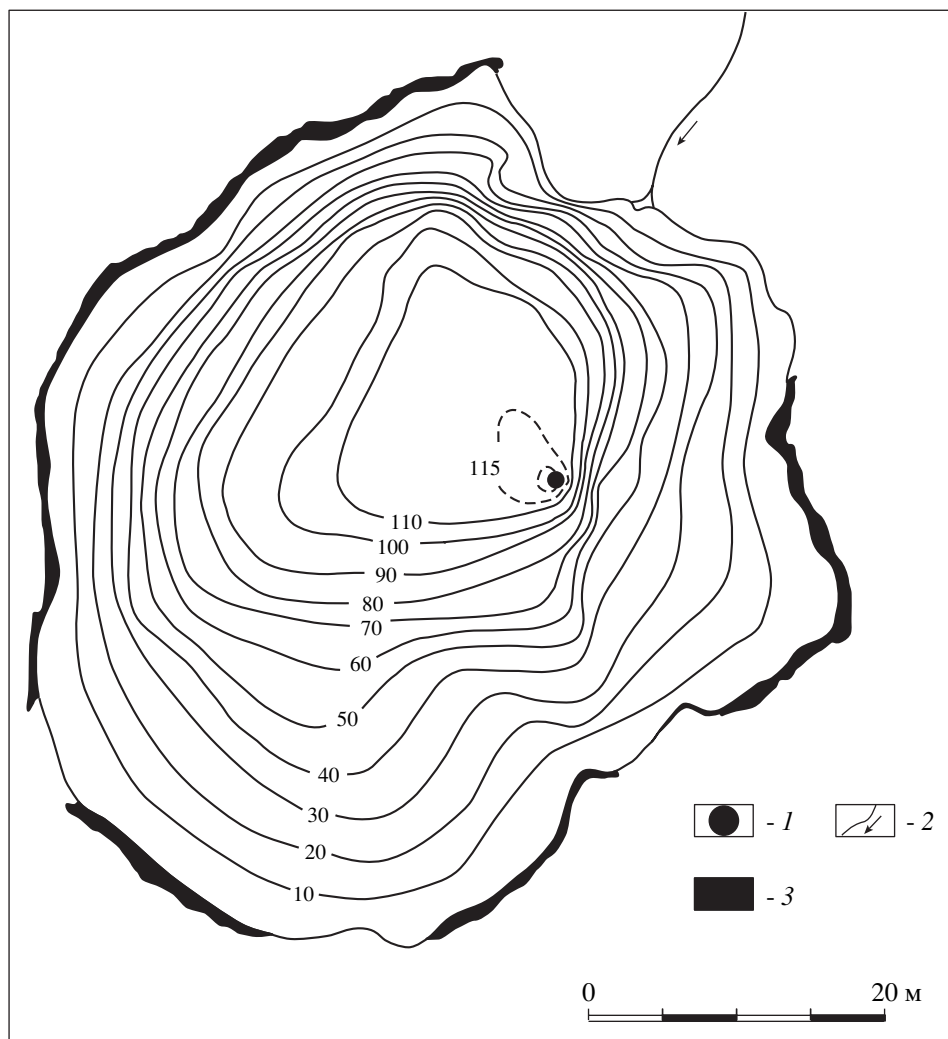


Рис. 1. Батиметрическая схема кратерного озера вулкана Малый Семячик, построенная по результатам измерений 1992 г. [14, 17] (изобаты в метрах): 1 – положение максимальной глубины озера (117 м) и основной зоны подводной газогидротермальной разгрузки; 2 – ручей, стекающий в озеро; 3 – скальный обрывы в кратере Троицкого.

ны от местных жителей и охотников, наблюдавших лишь “дымы” [2].

В настоящее время активный кратер вулкана заполнен кислым термальным озером (оз. Троицкого), обнаруженным и впервые описанным В.И. Влодавцем в 1946 г. [2]. Озеро округлой формы с диаметром порядка 500–600 м и площадью более 200000 м². Максимальные глубины озера, замеренные в разные годы, различны: от 117 до 140 м. Основные морфометрические параметры озера со времени его открытия и по настоящее время практически не менялись, очевидно, вследствие неизменности формы дна кратера. О постоянстве рельефа дна активного кратера вулкана можно судить как по результатам промерных работ в 1971, 1986 и 1992 гг. (рис. 1), так и по косвенным данным: отсутствию за последние десятилетия эксплозивных извержений из кратера, а также

эффузивной (подводной) деятельности на его дне [5–7, 14]. Поэтому непостоянство глубин озера в разные годы свидетельствует скорее о непостоянстве его уровня, т.е. объема водных масс.

Если действительно рельеф дна кратера за последние несколько десятилетий практически не менялся (по крайней мере, нет фактов, свидетельствующих об обратном), то дно озера на максимальной глубине имеет абсолютную отметку 1050 м над уровнем моря [7]. Исходя из этого, несложно рассчитать, что максимальная глубина озера в 1946 г. по данным В.И. Влодавца и др. (1948) [2] была около 154 м.

Значительно большую изменчивость за время наблюдений имели температура и химический состав воды, характеризующие активность вулкана и, как следствие, состояние оз. Троицкого, о чем

свидетельствуют собранные автором с коллегами данные за период с 1965 по 1992 гг. [5].

Имеющиеся на сегодня данные по вулкану Малый Семячик и кратерному оз. Троицкого свидетельствуют:

1) современная активность вулкана Малый Семячик проявляется, главным образом, в виде подводной газогидротермальной разгрузки на дне озера, существующего в его самом молодом кратере уже несколько десятилетий; установлена скрытая разгрузка воды из озера, составляющая по разным оценкам 100 ± 50 кг/с;

2) чередование фаз усиления и спада активности вулкана сопровождается изменением термических и гидрохимических характеристик вод кратерного озера;

3) первой известной нам фазой активизации вулкана была фаза "А", установленная в 1946 г. [2]; второй – в конце 60-х – начале 70-х гг. (фаза "Б") [6, 12] и третьей (фаза "В") – в середине 80-х гг. [5, 7];

4) в периоды между активными фазами газогидротермальная деятельность на дне кратера (озера) в значительной степени снижалась, но полностью не прекращалась. Об этом свидетельствует постоянно существующий в центре озера, в самом глубоком его месте, восходящий поток (грифон) термальной воды и остаточных (после конденсации) вулканических газов, хорошо перемешивающий озерные воды.

Имеющиеся данные по кратерным озерам активных вулканов свидетельствуют о значительных изменениях их уровней, не являющихся ни сезонными, ни, тем более, суточными. Как показано выше, подобные изменения установлены и для кратерного озера вулкана Малый Семячик. Понять причину колебаний уровня любого озера можно лишь на основе уравнения его водного баланса, а для кратерных озера активных вулканов – также уравнения теплового баланса.

Приводимые ниже построения, касающиеся теплового и водного балансов кратерного оз. Троицкого в различные фазы активности вулкана Малый Семячик, основываются на условии однородности его водных масс, что не противоречит действительности, особенно в периоды активизации вулкана, когда мощный газогидротермальный поток со дна озера интенсивно перемешивает всю массу воды. При снижении активности вулкана этот поток не исчезает, а становится менее интенсивным, по-прежнему, достаточно хорошо перемешивая водную толщу озера. Так, при очень низкой активности вулкана в 1992 г. водная толща оз. Троицкого была достаточно однородна по своим гидрохимическим характеристикам, вариации которых не превышали 12% [17], что находится в пределах ошибки приводимых ниже теоретических построений.

Тепловой баланс кратерных озера. Соотношение разнонаправленных потоков тепловой энергии для любого озера в общем виде может быть представлено следующим уравнением теплового баланса:

$$\sum Q_{\text{прих}} = \sum Q_{\text{расх}} + \sum Q_{\text{ак}}, \quad (1)$$

где $\sum Q_{\text{прих}}$ – сумма приходных компонентов баланса или интенсивность поступления в озеро тепловой энергии; $\sum Q_{\text{расх}}$ – тепловая энергия, расходуемая озером в единицу времени и представляющая собой сумму теплопотерь в атмосферу с поверхности озера и выноса тепла с разгружающимися озерными водами; $\sum Q_{\text{ак}}$ – сумма аккумуляционных элементов теплового баланса, это, в основном, изменение теплозапаса воды озера. В развернутом виде это уравнение может быть представлено так:

$$\begin{aligned} Q_{\text{конв}} + Q_{\text{конд}} + Q_{\text{хим}} + Q_{\text{солн}} + Q_{\text{ос}} = \\ = Q_{\text{исп}} + Q_{\text{конд}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{дрен}} + cV_{\text{ср}}(T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}), \end{aligned} \quad (2)$$

где в приходной части уравнения ($\sum Q_{\text{прих}}$): $Q_{\text{конв}}$ и $Q_{\text{конд}}$ – поступление в озеро тепла из глубинного (эндогенного) источника путем конвективного и кондуктивного теплопереноса; $Q_{\text{хим}}$ – тепловой эффект химических реакций; $Q_{\text{солн}}$ – поглощенная энергия солнца; $Q_{\text{ос}}$ – тепло, поступающее в озеро с атмосферными осадками, а в расходной части уравнения ($\sum Q_{\text{расх}}$): $Q_{\text{исп}}$ – теплопотери с испарением с поверхности озера; $Q_{\text{конд}}$ – кондуктивная теплоотдача поверхности озера в атмосферу; $Q_{\text{изл}}$ – эффективное излучение поверхности озера; $Q_{\text{дрен}}$ – тепло, теряемое озером со скрытым стоком; в сумме аккумуляционных элементов баланса ($\sum Q_{\text{ак}}$): c – удельная теплоемкость воды; $V_{\text{ср}}$ – средний объем вод озера в период времени Δt ; $T_{\text{кон}}$ и $T_{\text{нач}}$ – разность температур в конце и начале интервала Δt .

Уравнение (2) можно использовать для оценки неизвестных элементов теплового баланса, если другие его члены установлены в результате непосредственных наблюдений, анализа гидрогеологических и климатических условий, а также на основании теоретических предпосылок.

Для анализов основных, наиболее значимых факторов теплового баланса кратерных озера вулканов, находящихся в активной стадии, уравнение (2) может быть упрощено в результате взаимосо-кращений равных по величине, но противоположных по знаку элементов или исключения из него малозначимых членов баланса. Наибольший эффект от таких упрощений достигается при рассмотрении конкретных объектов, где некоторые параметры хорошо известны в результате много-

летних гидрометеорологических и ряда других наблюдений, а также получены при непосредственных специальных измерениях.

Например, для кратерного озера вулкана Малый Семячик в период его активизации в конце 60-х – начале 70-х гг. нынешнего столетия А.П. Горшков и др. [6] установили, что в приходной части теплового баланса этого озера наиболее значимым элементом является $Q_{\text{конв}}$ (уравнение 2). Остальные члены в этой части уравнения не превышают в сумме 2–3%, т.е. $\sum Q_{\text{прих}} \approx Q_{\text{конв}}$. В исходной части теплового баланса наиболее значимой является сумма теплопотерь в атмосферу с поверхности озера ($\sum Q_{\text{потер}} = Q_{\text{исп}} + Q_{\text{конд}} + Q_{\text{изл}}$), которая непосредственно определялась исследователями. Остальные элементы теплобаланса расходной части уравнения невелики и в сумме, частично компенсируемой второстепенными членами в приходной части баланса, не превышали 10% $\sum Q_{\text{потер}}$, при средней ошибке измерения 15% [6].

Из изложенного следует, что тепловая мощность вулканов, имеющих в своих активных кратерах озера, определяется главным образом интенсивностью поступления в их водную толщу глубинного флюида и приблизительно равна сумме теплопотерь с поверхности этих озер. В результате уравнение теплового баланса может быть представлено в следующем виде:

$$Q_{\text{конв}} \approx \sum Q_{\text{потер}} \quad (3)$$

Если учесть, что $Q_{\text{конв}} = m_{\text{флю}} \times i$, где $m_{\text{флю}}$ – интенсивность поступления в озеро глубинного теплоносителя (флюида), а i – теплосодержание (энтальпия) флюида, то уравнение примет вид:

$$m_{\text{флю}} \times i \approx \sum Q_{\text{потер}} \quad (4)$$

Поскольку поступающий в озеро глубинный флюид представлен главным образом водой (в жидкой или паровой фазах), то очевидно, что уравнение (4) имеет первостепенное значение при рассмотрении водного баланса кратерных озер.

Водный баланс бессточных кратерных озер. Как и в случае с тепловым балансом, под общим уравнением водного баланса для любого озера понимается равенство трех групп компонентов или составляющих:

$$\sum \Pi = \sum P + (\sum A), \quad (5)$$

где $\sum \Pi$ – сумма приходных компонентов водного баланса или интенсивность поступающей в озеро воды, куда входят атмосферные осадки, выпадающие на поверхность озера ($\Pi_{\text{ат.ос}}$), а также сток в озеро с его эффективной водосборной площади поверхностных и грунтовых вод ($\Pi_{\text{сток}}$). Для кра-

терных озер в периоды активизации вулканов весомым членом водного баланса является поступление в озеро со дна кратера глубинного флюида ($\sum \Pi_{\text{флю}}$), преобладающим компонентом которого является вода в паровой и (или) газовой фазах. То есть $\sum \Pi = \Pi_{\text{ат.ос}} + \Pi_{\text{сток}} + \Pi_{\text{флю}}$; $\sum P$ – сумма расходных компонентов баланса, т.е. количество воды, расходуемой из озера в единицу времени. Основными членами здесь являются испарение с поверхности озера ($P_{\text{исп}}$) и сток из него: поверхностный ($P_{\text{исп}}$), и скрытый, подземный сток ($P_{\text{дрен}}$), т.е. $\sum P = P_{\text{исп}} + P_{\text{дрен}}$; $\sum A$ – сумма аккумуляционных элементов баланса или изменение объема воды в озере за единицу времени $\Delta V = (V_{\text{конеч}} - V_{\text{нач}})/\Delta t$, где в скобках – разность конечного и начального объемов озера в интервал времени Δt .

В результате вышеизложенного уравнение (5) принимает вид:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ат.ос}} + \Pi_{\text{сток}} + \Pi_{\text{флю}} &= \\ &= P_{\text{исп}} + P_{\text{дрен}} + (V_{\text{конеч}} - V_{\text{нач}})/\Delta t. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя в это уравнение известные значения элементов водного баланса, полученные при исследовании на конкретном объекте, а также наиболее вероятные величины других членов баланса, в первом приближении можно устанавливать неизвестные его члены.

Водный баланс кратерного озера Троицкого (влк. Малый Семячик). Рассмотрим конкретные численные значения всех членов уравнения водного баланса (6) в периоды активизаций вулкана Малый Семячик. У нас нет достаточных данных для фазы “А” активизации вулкана, описанной В.И. Влодавцем и др. [2], наблюдавшими ее в 1946 г. Поэтому остановимся на последующих двух фазах: “Б”, регистрировавшейся с конца 60-х до середины 70-х гг., и “В”, изучавшейся в середине 80-х годов [5–7, 13].

В фазу “Б” уровень озера в сопоставимые периоды времени года, когда проводились исследования, был практически постоянным [6], поэтому в уравнении (6) сумму аккумуляционных элементов баланса можно принять равной нулю, т.е. $\Delta V \approx 0$. В результате уравнение (6) для этой фазы может быть представлено в следующем виде:

$$\Pi_{\text{ат.ос}} + \Pi_{\text{сток}} + \Pi_{\text{флю}} = P_{\text{исп}} + P_{\text{дрен}} \quad (7)$$

Для климатических и гидрогеологических условий Малого Семячика [1, 9] среднегодовые поступления $\Pi_{\text{сток}}$ и $\Pi_{\text{ат.ос}}$ приблизительно соответствуют сумме осадков, выпадающих на эффективную водосборную площадь озера, которая в общем соответствует его водосборной площади ($\Pi_{\text{ат.ос}} + \Pi_{\text{сток}} \approx \Pi_{\text{атм}}$). Используя данные наиболее близко расположенной от вулкана ГМС Жупаново о средней интенсивности поступления осадков в

рассматриваемом районе, а также учитывая гипсометрический уровень поверхности оз. Троицкого и площадь его водосбора, была рассчитана интенсивность поступления в него атмосферной влаги – $P_{\text{атм}}$. Она была оценена в рассматриваемый период времени величиной около 110 кг/с.

Установлено, что в кратере Троицкого основная разгрузка вулканических газов, преобладающим компонентом которых, как известно является водяной пар, происходит в самой глубокой, донной части озера [5–7]. Вероятное теплосодержание (i) этих вулканических газовых поступлений ~2.8 МДж/кг [4]. Эта величина энтальпии принята автором из следующих соображений.

Температура флюида, поступающего в кратерное оз. Троицкого, может колебаться в пределах от ~(170–180°C) до ~1000°C. Первые значения соответствуют температуре водяного пара на линии насыщения при давлениях, характерных для максимальных глубин озера, откуда происходит поступление глубинного теплоносителя. Второе значение соответствует высокотемпературному магматическому газу.

Наиболее вероятными представляются первые значения, поскольку измеренная температура расплавленной серы, обнаруженной на дне этого озера, очень близка к ним (166°C) [17]. Аналогичное соответствие установлено и для ряда других кратерных озер, таких как Югама (влк. Кусатсу-Шираке, Япония), Банное (кальдера Узон, Камчатка), Руапеху (Новая Зеландия) [18].

В периоды активных фаз $P_{\text{флю}}$ в уравнении (7) соответствует $m_{\text{флю}} \approx \sum Q_{\text{потер}}/i$ из уравнения (4). То есть для теплоотдачи с поверхности озера в активную фазу “Б” вулкана Малый Семячик ($\sum Q_{\text{потер}} = 375$ МВт) $P_{\text{флю}} \approx 135$ кг/с. В результате, в приходной части уравнения водного баланса (7) для рассматриваемой фазы активности интенсивность поступления воды в озеро около 245 кг/с.

Непосредственно замеренная величина испарения ($P_{\text{исп}}$) с поверхности озера составляла ~80 кг/с. Следовательно, из уравнения (7) скрытая разгрузка озера ($P_{\text{дрен}}$) в рассматриваемый период времени соответствует величине 165 кг/с.

Этот параметр ($P_{\text{дрен}}$) можно оценить и другим способом. Для этого воспользуемся эффектом опреснения вод озера после окончания активной фазы вулкана, т.е. после полного (или практически полного) прекращения поступления в озеро минерализованного флюида. В этом случае в озеро будут поступать только атмосферные осадки и вадозные воды, имеющие практически нулевую минерализацию. В результате этого концентрация растворенных веществ в водах озера начнет уменьшаться. Такой процесс, по-видимому, имел место в период с 1973 по 1974 гг., когда содержание наиболее консервативного растворенного компо-

нента в озере Cl-иона упало с 11.0 до 7.8 г/кг. Если учесть, что объем озера в эти годы составлял 15×10^6 м³ [6], то воспользовавшись формулой:

$$P_{\text{дрен}} = [2V/\Delta t] \times [(C_{\text{нач}} - C_{\text{кон}})/(C_{\text{нач}} + C_{\text{кон}})], \quad (8)$$

где V – объем воды в озере, а $C_{\text{нач}}$ и $C_{\text{кон}}$ – начальная и конечная концентрации Cl-иона за период времени Δt , находим скрытый сток озера, составляющий в рассматриваемый период времени ~162 кг/с. Сравнивая это значение с полученной выше из уравнения (7) величиной разгрузки озера, убеждаемся в схожести обеих независимых оценок.

В следующую фазу (“В”) активности вулкана максимальная тепловая мощность его (т.е. теплоотдача с поверхности кратерного озера) составляла ~200 МВт [7], что соответствовало расходу глубинного флюида по уравнению (4) в ~72 кг/с. В приходной части баланса, по тем же данным ГМС Жупаново для середины 80-х годов, сумма $P_{\text{атм}}$ составляла ~106 кг/с. В расходной части баланса измеренная величина испарения $P_{\text{исп}} \approx 32$ кг/с. Однако, в отличие от предыдущего периода наблюдений (в фазу “Б”), в уравнении водного баланса в год наибольшей активности вулкана (в 1986 г.) аккумуляционный член (ΔV) был значим и имел положительное значение. Действительно, с 1978 по 1986 гг. уровень оз. Троицкого постоянно повышался [7], что соответствовало средней скорости приращения объема его вод в этот период приблизительно на 13 кг/с.

Подставив в уравнение (6) полученные для фазы “В” значения элементов водного баланса, находим, что скрытый сток из озера в эту фазу ($P_{\text{дрен}}$) мог составлять приблизительно 133 кг/с.

Как и для фазы “Б”, определим независимым методом для фазы “В” значение скрытой разгрузки озера.

Установлено, что активность исследуемого вулкана стала снижаться с 1987 г., тогда же стабилизировался и уровень озера (его объем), оставшийся постоянным вплоть до 1991 г. В это же время в воде озера не происходило резкого снижения концентраций растворенных веществ. Очевидно, это было связано с продолжением поступления в озеро минерализованного флюида, но не в столь значительных количествах, чтобы обеспечивать, как и прежде, рост уровня озера и минерализацию его воды. Поступление флюида подтверждается наличием в центре озера в этот период времени восходящего со дна потока воды и газов. Поэтому для периода 1987–1991 гг. уравнение водного баланса, очевидно, было следующим:

$$P_{\text{атм}} + P_{\text{флю}} = P_{\text{дрен}}. \quad (9)$$

Отсутствие в нем расходного члена $P_{\text{исп}}$ связано со значительным снижением его величины (до сотых долей от значений других элементов ба-

ланса) вследствие падения температуры воды озера.

В период с 1991 по 1992 гг. практически полностью прекратилось поступление в озеро эндогенного флюида. Минерализация воды озера и, в частности, концентрация Cl^- -иона в ней значительно снизилась: с 5.04 до 3.40 г/кг. Снижение притока тепла и вещества с флюидом привело к тому, что зимой 1992 г. оз. Троицкого впервые за много лет замерзло, а уровень его стал падать [5].

С учетом отмеченных обстоятельств, средний объем озера в рассматриваемый период составлял $\sim 10.5 \times 10^6 \text{ м}^3$ (при соответствующей максимальной его глубине 117 м). Подставив значение объема вод озера в формулу (8), а также измеренные концентрации хлорид-иона в воде озера, находим, что $R_{\text{дрен}} \approx 130 \text{ кг/с}$. Как видно, эта величина практически идентична полученной для 1986 г. из уравнения (6).

В связи с этим важно отметить, что в фазу “Б” большему объему озера ($15 \times 10^6 \text{ м}^3$) и большей максимальной глубине (140 м), т.е. более высокой отметке его уровня, соответствовал и больший по величине скрытый сток ($\sim 160 \text{ кг/с}$). Вероятно, величина скрытой разгрузки озера прямо пропорциональна площади чаши кратера, заполненного его водами, что находится в соответствии с законом А. Дарси. Следовательно, зная эту площадь и величину скрытой разгрузки оз. Троицкого (например, на период 1992 г.), можем рассчитать коэффициент фильтрации пород, слагающих дно и стенки кратерного озера. Он равен 0.045 м/сут, что соответствует фильтрации воды озера через водоупорные (глинистые) породы [3], очевидно представленные гидротермально измененным субстратом, колматирующим породы кратера, которые контактируют с озерными водами. Из этого следует, что вариации величин скрытой разгрузки озера (скорости фильтрации через его дно) зависят главным образом от площади чаши кратера, заполненной кратерноозерными водами и, косвенно, от объема вод озера и их уровня. Другие параметры, от которых зависит скорость фильтрации (например, величина напорного градиента, вязкость жидкости и др.), для рассматриваемого конкретного объекта достаточно постоянны.

Подставим в уравнение (9) известные нам значения элементов водного баланса для периода 1991–1992 гг. $P_{\text{атм}}$, по данным ГМС Жупаново, составляла 104 кг/с, а установленный выше скрытый сток $R_{\text{дрен}} \approx 130 \text{ кг/с}$. Значит привнос флюида в это время мог составлять величину порядка 25–30 кг/с, что соответствует тепловой мощности около 80 МВт. Такая мощность недостаточна для сколько-нибудь значимого разогрева водных масс озера в кратере вулкана Малый Семячик, и, следовательно, для достижения значительных величин испарения с его поверхности.

Как было отмечено выше, после 1991 г. произошел дальнейший спад в активности вулкана, что привело практически к полному прекращению поступления в озеро глубинного флюида, т.е. слагаемое $P_{\text{флю}}$ в уравнении (9) оказывается малым в сравнении с другими значимыми членами водного баланса. К тому же, в 1992 г. было зафиксировано резкое падение уровня озера (летом 1992 г. он упал почти на 1.5 м). В результате уравнение (9) трансформируется в следующее:

$$P_{\text{атм}} = R_{\text{дрен}} + \Delta V, \quad (10)$$

где отсутствует $P_{\text{флю}}$ и вновь появляется аккумуляционный член (ΔV), имеющий уже обратный физический смысл. Так, из уравнения (10) следует, что $\Delta V \approx -30 \text{ кг/с}$, а это соответствует падению уровня озера приблизительно на 1 см в сутки.

Как видно из вышеизложенного, в разные периоды жизни кратерных озер уравнение их водного баланса принимает различный вид. Рассмотрение разных вариантов уравнения (6) дает нам возможность представить обобщенную, качественную картину эволюции водных масс кратерного озера во времени.

Гидрологическая модель бессточного кратерного озера. Проследим условную, но достаточно реальную цепь событий в жизни вулкана и его кратерного озера: (I) спокойная (неактивная) фаза \rightarrow (II) начальная фаза активизации вулкана \rightarrow (III) продолжение активной фазы в стабильном режиме \rightarrow (IV) спад активности вулкана (но не прекращение ее) \rightarrow (V) активность практически отсутствует, т.е. снова фаза (I).

Предлагаемая гидрологическая модель является качественной, т.е. основывающейся на оценке влияния различных факторов на озеро с использованием понятий: “есть влияние”, “нет влияния” или “влияние велико (невелико)” с последующей формулировкой изменений в озере под влиянием этих факторов [11]. Графически эволюция водных масс бессточного кратерного озера активного вулкана может быть представлена в следующем виде (рис. 2).

Структура такой модели представляет собой совокупность главных (определяющих) и функциональных факторов. Первые являются внешними, а вторые – внутренними, трансформирующими внешние и находящимися в сложном взаимодействии между собой, что определяет состояние озера. К главным (определяющим) факторам относятся климатические и метеорологические условия района исследований, гидрогеологические факторы, а также степень активности вулкана (для кратерных озер). Функциональные факторы определяются гидрофизическими, гидрохимическими и гидродинамическими параметрами озера и, в частности, величиной его разгрузки.

В развернутом виде отмеченная цепь событий в жизни кратерного озера действующего вулкана представляется следующей.

Фаза (I). В неактивный период водный баланс озера, очевидно, определяется двумя наиболее значимыми по величине его членами: интенсивностью поступления в озеро водных потоков с атмосферными осадками, выпадающими на водосборную площадь озера, и выноса из него вод в результате скрытого стока, пропорционального площади дна озера и коэффициенту фильтрации пород, его слагающих. В этой фазе уравнение водного баланса имеет наиболее простой вид:

$$P_{\text{атм}} \approx P_{\text{дрен}} \quad (11)$$

В этом уравнении отсутствует один из элементов расходной части водного баланса – потеря воды с испарением ($P_{\text{исп}}$). Это связано с тем, что в период неактивной фазы испарение с поверхности водоемов в районе с умеренным климатом (как район вулкана Малый Семячик) очень низкое и не превышает для водного зеркала площадью, равной поверхности оз. Троицкого, 1–2 кг/с, составляя примерно 1% от величины других значимых элементов баланса (например, скрытой разгрузки).

Фаза (II). В начальный период активизации вулкана приходная часть водного баланса возрастает за счет дополнительного поступления воды в озеро с глубинным флюидом (в приходной части уравнения появляется $P_{\text{флю}}$). В результате объем озера начинает увеличиваться, растет его уровень (в расходной части появляется аккумуляционный член баланса). Но так как тепло, поступающее в озеро с глубинным теплоносителем, в начальный период уходит на повышение теплозапаса озерных вод (их температуры), испарение по-прежнему невелико. Поэтому в начальный период активизации вулкана испарение с поверхности озера будет незначительным, а уравнение водного баланса в этой фазе будет выглядеть так:

$$P_{\text{атм}} + P_{\text{флю}} = P_{\text{дрен}} + \Delta V, \quad (12)$$

при этом $\Delta V > 0$.

Фаза (III). Эту фазу можно разбить на две подфазы.

Подфаза III_а. Если активность вулкана продолжается в стабильном режиме, то температура воды в озере достигает сравнительно высоких значений, адекватных тепловой мощности вулкана. В результате быстро возрастает величина испарения с поверхности озера, становясь сопоставимой по величине с другими элементами баланса. Приращение объема озера в течение этой фазы идет уже за счет разностей скоростей между поступлением воды в составе глубинного теплоносителя (флюида) и испарением воды с поверхности озера. Известно, что второй процесс

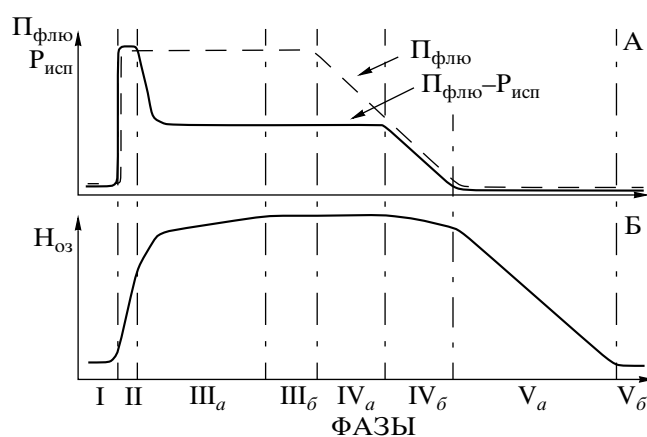


Рис. 2. Условные графики вариаций некоторых параметров, характеризующих состояние кратерного озера активного вулкана в различные периоды (фазы, см. текст) его деятельности: А – вариации $P_{\text{флю}}$ (интенсивность поступления в озеро воды с глубинным флюидом) и $P_{\text{исп}}$ (интенсивность испарения воды с поверхности озера); Б – изменения $H_{\text{оз}}$ (глубина озера). Параметры озера и продолжительность фаз во времени представлены на графиках вне масштаба.

менее интенсивен по отношению к первому в среднем на 1/2 и варьируем в зависимости от температуры воды в озере, адекватно отражающей тепловую мощность вулкана, от 1/3 до 2/3 [8].

Вторым, наиболее эффективным и остающимся практически единственным в данную фазу компенсационным процессом в нарушенном балансе озерных вод является скрытая разгрузка озера. Она очевидно возрастает, как было показано выше, в соответствии с законом А. Дарси, поскольку с увеличением объема озера растет площадь его дна и, соответственно, скорость фильтрующихся вод. Этот факт хорошо подтверждается результатами исследований на кратерном оз. Югма [16].

В этот период уравнение водного баланса озера представлено в полном виде (уравнение б):

$$P_{\text{атм}} + P_{\text{флю}} = P_{\text{исп}} + P_{\text{дрен}} + \Delta V. \quad (13)$$

Как следует из этого уравнения, чем больше тепловая мощность вулкана, т.е. когда в озеро поступает большее количество эндогенного флюида, а также большее время длится активная фаза, тем больше становится объем воды в озере и, соответственно, повышается его уровень. Действительно, в 1946 г., когда мощность вулкана превышала 1000 МВт, глубина озера была ~154 м (см. выше), в период активизации вулкана Малый Семячик в начале 70-х гг. (375 МВт) максимальная глубина озера была 140 м [6], а в середине 80-х гг. при мощности 200 МВт наибольшая глубина озера была уже 132 м [5, 7]. Когда активности в озере практически не было (в 1992 г.), измеренная глубина составляла только 117 м [14, 17]. Ес-

тественно, что все эти рассуждения верны, как отмечено выше, лишь при условии неизменности морфологии дна кратера вулкана.

Подфаза IIIб. Когда площадь поверхности дна озера возрастет настолько, что скрытый сток достигнет максимальных значений и, в сумме с испарением, полностью компенсирует приходную часть водного баланса, т.е. когда аккумуляционный член станет равным нулю, уровень озера стабилизируется, и уравнение баланса примет вид:

$$P_{\text{атм}} + P_{\text{флю}} = P_{\text{исп}} + P_{\text{дрен}} \quad (14)$$

Фаза (IV). Эту фазу также можно разбить на две подфазы.

Подфаза IVa. На первых этапах завершения активности вулкана $P_{\text{флю}}$, оставаясь значимым членом в балансе вод, снижается настолько, что уже недостаточен для поддержания высокой температуры озера и, соответственно, существенного испарения с его поверхности. В этом случае водный баланс кратерного озера можно описать приближенно уравнением (9).

Подфаза IVб. При дальнейшем снижении активности вулкана, т.е. уменьшении $P_{\text{флю}}$, начинает падать уровень озера. В результате, в правой части уравнения водного баланса появляется

Соотношение основных параметров, характеризующих состояние кратерного озера Троицкого в различных фазы активности вулкана Малый Семейчик

Параметры	I 1946 г.	II 1971 г.	III 1986 г.	IV 1991–1992 гг.
Q , МВт	– ~1100*	375 ± 55 374	201 ± 30 207	– <100
T , °C	66	42	31	17
H , м	– ~154	$\frac{140}{-}$	$\frac{132}{-}$	$\frac{117}{-}$
$V_{\text{оз}}$, 10^6 м ³	– ~19	$\frac{15}{-}$	– ~10.7	$\frac{10.4}{-}$
$\Delta V_{\text{оз}}$, кг/с	– –	$\frac{\pm 0}{-}$	$\frac{+13}{-}$	$\frac{\leq -15}{-30}$
$P_{\text{дрен}}$, кг/с	– –	$\frac{162}{165}$	$\frac{130}{133}$	– ≤ 130

Примечание. Q – тепловая мощность вулкана (* – тепловая мощность по формуле из [15] для кратерного оз. Руапеху, схожего по своим параметрам с оз. Троицкого); H – максимальная глубина озера; $V_{\text{оз}}$ – объем озера; $V_{\text{оз}}$ – скорость увеличения объема озера; $P_{\text{дрен}}$ – скрытая разгрузка озера. В числителе – измеренные параметры, в знаменателе – параметры, полученные расчетом. I–IV – фазы активности вулкана (см. текст).

расходный “аккумуляционный” член:

$$P_{\text{атм}} + P_{\text{флю}} = P_{\text{дрен}} + \Delta V. \quad (15)$$

Фаза (V). После окончания активной фазы поступления глубинного флюида можно пренебречь, т.е. приходная часть водного баланса обеспечивается лишь притоком вадозных вод. По-прежнему продолжается уменьшение $P_{\text{дрен}}$ и падение уровня воды в озере, а уравнение водного баланса имеет следующий приближенный вид:

$$P_{\text{атм}} = P_{\text{дрен}} + \Delta V. \quad (16)$$

Этот период можно условно обозначить, как *подфазу Va*.

Уровень озера понижается до тех пор, пока величина скрытого стока не будет соответствовать интенсивности поступления на его водосборную площадь атмосферных осадков, т.е. пока не наступит равновесие (уравнение 11):

$$P_{\text{атм}} = P_{\text{дрен}} \quad (\text{это подфаза Vб}).$$

т.е. мы вновь возвратились к случаю, когда активности нет (фаза II).

В эту, неактивную стадию, практически только скрытый сток компенсирует поступление воды в озеро. В такие периоды скрытая разгрузка минимальна и о величине приблизительно соответствует интенсивности поступления атмосферных осадков, выпадающих на водосборную площадь озера.

Как видно из вышеизложенного, при любом нарушении равновесия водного баланса в озере развиваются компенсационные процессы, ведущие к стабилизации водных масс. При этом основными регулируемыми (компенсационными) процессами в бессточном озере, направленными на сбалансирование разнонаправленных потоков воды, являются испарение с его поверхности и скрытая разгрузка. Причем последняя является основным (значимым) параметром, “работающим” эффективно во все фазы деятельности вулкана.

Рассмотренная модель учитывает наиболее важные свойства озера как системы, устанавливая качественные взаимодействия между ее элементами и, тем самым, отражает характер внутрисистемных и внешних связей. Эта модель может служить основой количественной модели эволюции озера и являться программой для проведения направленных экспериментов с целью выявления объективных функциональных связей параметров озера и, в перспективе – создания его прогностической модели.

Расчет наиболее характерных количественных параметров, отражающих состояние оз. Троицкого в различные периоды времени (фазы активности вулкана), проведен автором на основании предложенной модели с использованием имеющихся натуральных данных и геометрической модели, описываемой ниже. Результаты приведены в таблице.

Геометрическая модель кратерного озера. Одним из первых шагов в создании количественной гидрологической модели бессточного озера является его геометрическая модель, позволяющая с достаточной точностью описать соотношение его основных параметров.

Из приведенных выше данных хорошо прослеживается зависимость некоторых элементов водного баланса (например, $P_{дрен}$) с морфометрическими параметрами бессточного озера: глубиной, объемом и площадью его дна.

Рассмотрим на геометрическом аналоге озера возможные количественные связи между этими параметрами. Целью рассмотрения такой модели является установление соотношений между варьируемыми линейными размерами ее и элементами водного баланса.

Для того, чтобы установить взаимозависимость вышеотмеченных параметров, для расчетов был выбран близкий по геометрической форме оз. Троицкого усеченный конус с переменной, постоянно возрастающей высотой и, соответственно, меняющимся объемом. Его исходными размерами были выбраны следующие: высота (условная начальная глубина озера) – 100 м, малый радиус (условная поверхность днища кратера) – 80 м и большой радиус (вероятная исходная поверхность зеркала озера) – 153 м. Конечным, подобным исходному, стал конус с линейными параметрами, близкими по размерам современному озеру: высотой (глубиной) – 130 м, соответственно, увеличившимся большим радиусом зеркала озера – 302 м. Естественно, малый радиус остался прежним – 80 м (рис. 1).

Как отмечалось выше, состояние озера определяет целый ряд главных (определяющих) и функциональных факторов, представляющих, в частности, для водного баланса озера совокупность его элементов. Если рассмотреть уравнение (6), то в нем определяющие факторы водного баланса находятся в приходной, а функциональные – в расходной его частях. Например, $P_{исп}$ зависит, в основном, от величины $P_{флю}$ (метеоусловия влияют на этот параметр, но не столь значительно), а скрытый сток ($P_{дрен}$), помимо фиксированной зависимости от ряда физических характеристик (например, коэффициента фильтрации пород, слагающих дно озера), зависит главным образом от постоянно меняющегося объема озера, о чем косвенно свидетельствуют вариации его уровня, естественно, при обязательном условии неизменности морфологии дна кратера вулкана.

Несложные расчеты с использованием вышепредложенной условной геометрической модели показывают, что во II и III фазы активности вулкана, когда идет рост объема водных масс озера, увеличивается площадь его дна и повышается уровень озера. Причем изменение этих параметров для рассматриваемой модели происходит приблизи-

тельно в соотношении 7 : 4 : 2,5, соответственно. А поскольку, в соответствии с законом А. Дарси, с увеличением площади дна возрастает скорость фильтрации озерных вод, отражающая интенсивность скрытого стока, то его возрастание с ростом уровня озера находится в отношении 4 к 2,5.

Следует отметить, что пропорционально росту площади дна увеличивается и площадь поверхности озера. Однако это не сказывается существенно на повышении интенсивности испарения в периоды стабильной деятельности вулкана (фаза III), так как с постоянным $P_{флю}$ в озеро привносится и постоянное количество тепла, поэтому $P_{исп}$ остается все это время также постоянным. В такие периоды основным компенсационным процессом, стремящимся привести воды озера к равновесию (постоянному уровню), является только скрытый сток ($P_{дрен}$).

Все рассмотренные выше построения проводились без учета существующих в природных условиях вариаций уровня озера, связанных с фазами гидрологического года, т.е. сезонами года.

Сезонные вариации уровня кратерного оз. Троицкого. Сезонные вариации интенсивности поступления в озеро атмосферной влаги связаны, главным образом, с климатическими факторами, т.е. сменой “холодного” и “теплого” времен года. Для географической позиции вулкана Малый Семячик продолжительности этих периодов приблизительно равны, и составляют каждый по полгода. В зимние месяцы атмосферная влага накапливается на водосборной площади озера в основном в виде снега. При этом в активную фазу в зимний период вода в озеро все же поступает, но только с осадками, выпадающими непосредственно на его поверхность, составляющими около 30% всего водосбора. В неактивную фазу, когда озеро замерзает, твердые осадки накапливаются на всей водосборной площади озера.

Несложно подсчитать, что в “теплый” период времени года в активную фазу вулкана в озеро поступает ~50% годовой нормы осадков плюс ~70% от половины годовой нормы осадков, выпавших за полгода в “холодный” период года, т.е. выше 35% годовой нормы. В итоге в “теплый” период, в активную фазу интенсивность поступления атмосферных вод в озеро составляет ~2 × 85% от среднегодовой интенсивности, равной для оз. Троицкого 100 ± 10 кг/с.

В неактивную фазу деятельности вулкана в летний сезон интенсивность поступления атмосферной влаги в озеро практически в два раза превышает среднегодовое поступление осадков на его водосборную площадь.

Однако мы не имеем круглогодичных детальных наблюдений за интенсивностью поступления атмосферных вод в кратерное озеро. Поэтому

при учете сезонных колебаний уровня озера будем использовать приведенные выше допущения.

Для вулкана Малый Семячик поступление атмосферных осадков в кратерное озеро в пересчете на интенсивность их поступления на водосборную площадь в течение последних десятилетий составляет 100 ± 10 кг/с. Следовательно, летом в активную фазу максимально возможная интенсивность поступления атмосферной влаги в озеро будет составлять 170, а в неактивную – 200 кг/с.

Если задаться условием, что в какой-то момент времени при переходе от “холодного” к “теплому” времени года объем озера составляет 10×10^6 м³, его максимальная глубина – 100 м, а скрытая разгрузка – 100 кг/с, то только за счет притока в озеро вод атмосферного происхождения в “теплый” сезон (1/2 года) общая масса его вод увеличится приблизительно на 11% – в активную, и на 16% – в неактивную фазы деятельности вулкана. Такое увеличение объема озера будет соответствовать повышению уровня его вод на 4 и 5.8 м, соответственно. То есть, возможные вариации положения поверхности озера относительно некоего среднего его значения в течение всего года не превысят ± 2 м – в первом, и ± 3 м – во вторых случаях.

Однако в активную фазу в озеро поступает дополнительное (достаточно большое) количество воды в составе глубинного флюида. В результате сезонные флюктуации уровня озера значительно нивелируются эндогенными процессами. Например, в течение 5 лет при мощности вулкана 200 МВт уровень озера повысится на 14.5 м, а при 400 МВт – более, чем на 20 м.

Выводы. 1. На основе анализа уравнений теплового и водного балансов кратерного озера вулкана Малый Семячик в разные периоды его деятельности, а также условной, но реальной цепи событий в жизни кратерного озера активного вулкана было установлено: что больше тепловая мощность вулкана и чем больше время его активизации, тем больше объем кратерноозерных вод.

2. Основным компенсационным процессом в балансе водных масс бессточного озера во все фазы деятельности вулкана является скрытая (подземная) разгрузка озерных вод, зависящая от величины площади дна озера, т.е. его объема и, соответственно, уровня. Для кратерного оз. Троицкого этот параметр с конца 60-х до середины 70-х гг. составлял ~ 160 кг/с, а с середины 80-х до начала 90-х гг. ~ 130 кг/с.

3. Максимально возможные сезонные вариации уровня озера Троицкого не превышают неактивную фазу деятельности вулкана ± 3 м. В активную фазу эти вариации, составляющие ± 2 м, не существенны в сравнении с более значительным повышением уровня вод озера в результате поступления в него дополнительной воды с глубинным флюидом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакин Е.А., Сугробов В.М. Гидрогеологические особенности вулканических структур и современные гидротермальные системы // *Гидрогеология СССР*. Т. 29. М.: Недра, 1972. С. 169–196.
2. Влодавец В.И., Морозов А.И., Троицкий В.Д. Вулкан Малый Семячик // *Бюл. вулканол. станций*. 1948. № 15. С. 17–27.
3. *Водопроницаемость* // *Горная энциклопедия*. Т. 1. М.: Советская энциклопедия. 1984. С. 412.
4. Вукалович М.П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара // М.: Энергия, 1965. 399 с.
5. Гавриленко Г.М., Двигало В.Н., Фазлуллин С.М., Иванов В.В. Современное состояние вулкана Малый Семячик (Камчатка) // *Вулканология и сейсмология*. 1993. № 2. С. 3–7.
6. Горшков А.П., Гребзды Э.И., Самойленко Б.И., Слезин Ю.Б. К расчету баланса тепла и массы кратерного озера вулкана Малый Семячик // *Бюл. вулканол. станций*. 1975. № 51. С. 50–59.
7. 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.
8. Ковалев Г.Н., Слезин Ю.Б. Метод измерения теплоток через термальные водоемы и тепловая мощность кальдеры Узон // *Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование*. М.: Недра, 1974. С. 110–116.
9. Кондратьев В.И. Климат Камчатки. М.: Гидрометеиздат, 1974. 204 с.
10. *Краткая географическая энциклопедия*. Т. 1. М.: Советская энциклопедия, 1960. С. 229.
11. Севастьянов Д.В. Разработка качественной модели эволюции горного озера // *Моделирование и экспериментальные исследования гидрологических процессов в озерах*. Л.: Наука, 1986. С. 59–66.
12. Селянгин О.Б. Петрогенезис базальт-дацитовый серии в связи с эволюцией вулканоструктур. М.: Наука, 1987. 148 с.
13. Слезин Ю.Б., Ковалев Г.Н., Гребзды Э.И., Чеглицова Е.А. Об активности вулкана Малый Семячик // *Бюл. вулканол. станций*. 1971. № 47. С. 37–39.
14. Gavrilenko G.M., Egorov Yu.O., Osipenko A.B. Resent changes in the physico-chemical characteristics of the crater lake Maly Semiachik volcano, Kamchatka // *Current Res. On Volcanic Lakes*. 1996. № 9. P. 11–13.
15. Hurst A.W., Dibble R.R. Bathymetry, heat output and convection in Ruapehu Crater lake, New Zealand // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1981. V. 9. P. 215–236.
16. Ohba T., Hirabayashi J.-I., Nogami K. Water, heat and chloride budgets of the crater lake, Yugama at Kusatsu-Shirane volcano, Japan // *Geochem. J.* 1994. V. 28. P. 217–231.
17. Takano B., Matsuo M., Suzuki K. et al. Bathymetry and chemical investigation of crater lake at Maly Semiachik // *WRI-9*. 1995. P. 47–49.
18. Takano B., Saitoh H., Takano E. Geochemical implications of subaqueous molten sulfur at Yugama crater lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan // *Geochem. J.* 1994. V. 28. P. 199–216.

A Hydrological Model for a Lake in the Malyi Semyachik Crater, Kamchatka

G. M. Gavrilenko

*Institute of Volcanology, For East Division, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

A hydrologic model is suggested for a drainless lake in the crater of an active volcano based on hydrologic measurements in the lake of the Malyi Semyachik crater. This model was used to calculate parameters that characterize the state of the lake during different phases of the volcano's activity. It was found that the main compensation process in the water balance of drainless crater lakes during all phases of volcanic activity was the underground water discharge, the amount of which is directly related to the floor area of the lake and, consequently, to its volume. It was established that the seasonal variations of the Malyi Semyachik crater lake level were below ± 2 m, the value insignificant compared to the higher water levels of the lake caused by the fluids rising from the volcanic source.