

привели к выносу пирокластического материала извержений в сторону юго-западного сектора вулкана. Этот факт совместно с фактом уменьшения в 1.5-3 раза высоты внутренних стенок большого кратера вулкана свидетельствует о существенно возросшей вулканической опасности Безымянного для прилегающих территорий.

5. Объективная и точная оценка геологического эффекта извержений, точное картографирование их последствий невозможны без своевременных и полноценных дистанционных наблюдений за активными вулканами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двигало В.Н. Морфологические предвестники (первые признаки) активизации некоторых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 3-20.

УДК 551.217.24

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ НАКОПЛЕНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПЕПЛОВ

В БАССЕЙНЕ ОЗЕРА КАРЫМСКОГО

С.Б. Самойленко, Г.А. Карпов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; email: samsergey@kscnet.ru

В статье, на основе многолетних наблюдений, реальных измерений и расчетов, получены оценки количества вулканических пеплов, поступающих от извергающегося Карымского вулкана в бассейн озера Карымского. Сделан вывод о слабом влиянии пеплов на общую минерализацию воды озера.

Введение. После подводного извержения 1996 года, в кальдере Академии Наук, заполненной Карымским озером, произошли изменения в морфологии озерной воды: в северном секторе озера возник кратер Токарева, глубиной около 60 м и диаметром более 600 м, северный борт которого поднялся над водой и сформировал полуостров Новогодний [6]. В истоке реки Карымской, вытекающей из озера, образовалась новая группа термальных источников (Пийповских) [3]. В результате перепланировки местности, площадь зеркала воды Карымского озера уменьшилась приблизительно на 0.5 км² [5]. Продолжающееся поныне (с 1996 года) извержение Карымского вулкана оказывает существенное влияние, как на процесс седиментации в бассейне Карымского озера, так и на минерализацию воды в озере. Степень этого влияния зависит от многих факторов.

Данная статья посвящена анализу условий накопления пепла, извергаемого Карымским вулканом, в бассейне Карымского озера и оценке степени влияния вулканических пеплов на минерализацию воды в озере.

Динамика минерализации воды в озере. После извержения 1996 года Карымское озеро из ультрапресного превратилось в водоем с минерализованной водой [3, 6]. В 1996 году минерализация воды достигала 900 мг/л. В течение последующих лет минерализация уменьшалась и к 2006 году составила 500 мг/л [3].

Простейшее уравнение, описывающее изменение минерализации воды в озере со временем, имеет вид

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{Q}{M}c + \frac{J}{M}. \quad (1)$$

Здесь c – концентрация минеральных веществ, Q – водный баланс озера, M – масса воды в озере, J – количество минеральных веществ, попадающее в озеро в единицу времени. Если предположить, что J не зависит от времени, то можно записать решение уравнения (1) для начальных условий $c(0) = c_0$:

$$c = \left(c_0 - \frac{J}{Q}\right)e^{-\frac{Q}{M}t} + \frac{J}{Q}. \quad (2)$$

Если бы в озере не было никаких источников минерализации ($J = 0$), то спустя 10 лет при $M = 460.6 \cdot 10^6$ тонн [5], $Q = (1.5 \pm 0.1)$ тонн/сек, $c_0 = (900 \pm 100)$ мг/л минерализация уменьшилась до $c = (300 \pm 50)$ мг/л. Текущее, более высокое значение минерализации указывает на то, что в озеро продолжают поступать минеральные вещества. Их текущая концентрация $c = (500 \pm 100)$ мг/л соответствует постоянному притоку минеральных веществ $J = (13.6 \pm 7) \cdot 10^3$ тонн/год.

Эти вещества могут приноситься в озеро термальными источниками, как наземными, так и подводными, или вымываться из попадающего в озеро вулканического пепла Карымского вулкана. Оценке количества выпадающего в озеро пепла и анализу условий его накопления в озере и посвящена данная статья.

Условия накопления пепла в озере. Рассмотрим различные пути попадания пепла в воду озера: 1) попадание пепла непосредственно на водную гладь озера, 2) выпадение пепла на акваторию замерзшего озера и 3) перенос пепла из озерного бассейна в воду озера.

1) Непосредственно на водную гладь озера пепел может попадать в то время, когда поверхность озера не покрыта льдом и снегом, то есть, с июня по ноябрь – 5-6 месяцев.

Мелкие частицы пепла, попавшие на поверхность озера, погружаются достаточно долго. За время погружения они могут быть снесены течениями и вынесены из озера. Оценим, насколько этот эффект может быть существенным.

Скорость оседания частиц сечением r в воде можно оценить исходя из закона Стокса [3], как

$$u_w = \frac{9}{2} \frac{g}{h} D r r^2,$$

где $g = 9.81 \text{ м/с}^2$, $h = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см} \cdot \text{с}$ – вязкость воды, $D r = r_a - r_w \gg 200 \text{ кг/м}^3$ – разница плотностей воды и частиц пепла. При размерах $0,1 \text{ мм} \leq r \leq 1 \text{ мм}$ скорость оседания составляет $2.5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с} \leq u_w \leq 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. На дно, на глубину 60 м эти частицы опустятся за время от 6 ч до 30 дней. Если течение в озере в сторону истока реки Карымская было бы достаточно интенсивным (более $0,002 \text{ м/с}$), то мелкие частицы (менее 0.1 мм), попавшие на водную гладь не успели бы осесть на дне и были бы вынесены рекой. Течения в озере могут возникать из-за 1) приноса воды ручьями и выноса ее рекой, 2) ветров и 3) конвективного движения в толще воды, связанного с разогревом дна озера. Первый фактор способствует выносу пепла из озера, второй и третий – переносу пепла по дну озера.

Простая оценка средней скорости течения, связанного со стоком воды, не рассматривающая струйных течений в озере, дает величину 10^{-5} м/с . Это на два порядка меньше скорости, необходимой для выноса частиц из озера. Так что первым фактором можно пренебречь.

Пепел приносится от Карымского вулкана к озеру северными ветрами и, следовательно, ветровые течения, влияющие на оседание пепла в озере, так же обусловлены этими ветрами. Согласно теории Экмана для ветровых течений [4], северный ветер создаст северное – северо-восточное течение, которое с глубиной будет менять свое направление и быстро уменьшаться. В придонной части образуется противотечение, связанное с нагоном воды в южную и юго-восточную части озера. Приповерхностные течения способствуют сгону частиц пепла в южную сторону озера, а противотечения – выносу их в центральную часть акватории. Оценочные скорости этих течений ($1\text{-}5 \text{ см/сек}$ для ветров $3\text{-}7 \text{ м/с}$) [4] достаточны для того, чтобы оказать существенное влияние на перенос пепла в толще озера. Однако из-за того, что пепел приносится именно северными ветрами, эти течения не приводят к выносу материала из озера, а лишь перераспределяют его по дну. Следует учесть и то, что мелкие и сильно вспененные частицы пепла могут плавать на поверхности озера. Это тем более способствует их сносу к берегам ветрами.

Оценить величины для скоростей конвективных течений, не имея картины прогрева дна озера, трудно. Однако можно предположить, что эти течения должны лишь перераспределять пепел по акватории. Если прогрев, как это следует из наблюдений, главным образом, происходит у берегов озера, то конвективные течения будут способствовать накоплению пепла в центральной части озера.

Подводя итог, можно сделать вывод, что практически весь пепел, выпавший на водную гладь озера остается в озере и оседает на его дне.

2. В период, когда вода в озере покрыта льдом и снегом, пепел, попадая на акваторию озера, накапливается в снегу. На рис. 1 показаны пепловые горизонты в толще снега; шурф выкопан на полуострове Новогоднем в апреле 2006 года. С таянием льда и снега, примерно в течение месяца весь накопленный за зиму пепел попадает в озеро. Если предположить, что в активный период вулкана пепел выпадает равномерно зимой и летом, то зимний пепел может образовывать на дне озера однородные слои. В этих сезонных слоях может находиться до половины пепла выпавшего за сезон.



Рис. 1 Отложения вулканического пепла в снежной толще на полуострове Новогоднем в апреле 2005 г. Фото Жиделевой Т. М.



Рис. 2. Слои в донных отложениях. Керн взят на дне кратера Токарева в 2005 г. Фото Карпова Г. А.

Эта оценка весьма груба, так как весной течения в озере не менее, а то и более активны, чем в другое время года, в связи с обильным таянием снега. Кроме этого, пепел выбрасывается вулканом весьма неравномерно по времени. Однако, эти сезонные колебания накопления пепла могут быть заметны в течение достаточно длительного периода активности вулкана. В кернах взятых на дне кратера Токарева в 2005 году видны слои в рыхлых отложениях (рис. 2), которые могут быть связаны с описанными сезонными особенностями накопления пепла.

3. Площадь озерного бассейна (кальдерной структуры) примерно на 30% больше площади акватории Карымского озера. Пепел, выпавший на территорию бассейна, может попасть в озеро с помощью ручьев и ветра.

В озеро впадает 25 ручьев и временных водотоков. В приносе пепла ручьями важную роль играет сезонный фактор. В зимние месяцы этого приноса нет вовсе, зато пепел накапливается в толще снега. В период таяния: весной и в течение лета ручьи переносят пепел, накопившийся за зиму в озерном бассейне. Пепел, попадающий на этой территории на почву, ручьями и метеорными водами почти не переносится. Но и летом снежники, питающие ручьи, тают медленно, и на них продолжает выпадать вулканический пепел.

По мере таяния, снежники переносят незначительную часть выпавшего на них пепла. Однако можно предположить, что какая-то часть его оказывается, в конце концов, в ручье, бегущем по дну распадка. Если это так, то пепел должен накапливаться в озере неравномерно: его должно быть больше по берегам, в районе конусов выноса ручьев и меньше – в центральной части озера. Однако, этот эффект может нивелироваться ветровыми и конвективными течениями. Кроме этого, многие впадающие в озеро ручьи берут свое начало из ключей у самого берега и несут только отфильтрованную воду. С другой стороны, выпавший на площади озерного бассейна пепел эффективно переносится ветрами и таким образом может попадать на акваторию озера.

Даже если лишь малая часть пепла приносится в воду озера из озерного бассейна, талые и метеорные воды должны приносить в озеро минеральные вещества, вымытые из пеплов. Таким образом, роль пепла, выпадающего на площадь бассейна, становится еще более значимой.

Можно предположить, что пепел, перенесенный с площади озерного бассейна, составляет от 25% до 10% общего количества попадающего в озеро пепла.

Накопление пепла в кратере Токарева.

Следует отметить особенности накопления пепла в кратере Токарева.

Подводный кратер Токарева отделен от акватории озера банкой, поднимающейся до глубин 3-5 м. Это может приводить к тому, что течения в нем возникают только из-за ветра и конвекции. Кроме того, в него не впадают ручьи (единственный ручей, сбегаящий с северного борта озерной кальдеры прежде, чем попасть в кратер, должен пересечь полуостров Новогодный и на этом пути он практически полностью уходит в грунт, так что в кратер попадает только отфильтрованная вода). Для кратера остаются справедливыми рассуждения о сезонных колебаниях в накоплении пепла, выпадающего непосредственно на его акваторию. Кроме этого, можно оценить снос частиц, попавших на поверхность воды в кратере, ветровым течением.

Пользуясь теорией ветровых течений, можно детально рассчитать структуру течений в кратере Токарева, возникающих при ветрах различной силы и румбов. Однако для начала, ограничимся оценочными расчетами.

Воспользуемся уравнениями Экмана для расчета скорости и профиля ветрового течения [4]. Считаем, что ветер – северный, рассмотрим только меридиональную составляющую скорости течения, поскольку именно она выносит взвешенные частицы из кратера. На рис. 3 а) показаны эпюры меридиональной составляющей скорости ветрового течения в середине кратера для ветров различной силы. Видно, что спутное ветру приповерхностное течение сменяется противотечением с ростом глубины. Частица пепла, упавшая на поверхность воды в кратере, останется в нем, если за время опускания до глубины 5-10 м (глубины банки в южной части кратера) ее не вынесет ветровым течением. Воспользуемся законом Стокса для оценки скорости оседания частицы и расчетными скоростями течений для того, чтобы выяснить, какие частицы при каких скоростях ветра покинут акваторию кратера. На рис. 3 б) показано расстояние, которое проходят частицы различного размера при различной скорости ветра при погружении на глубину 5 м.

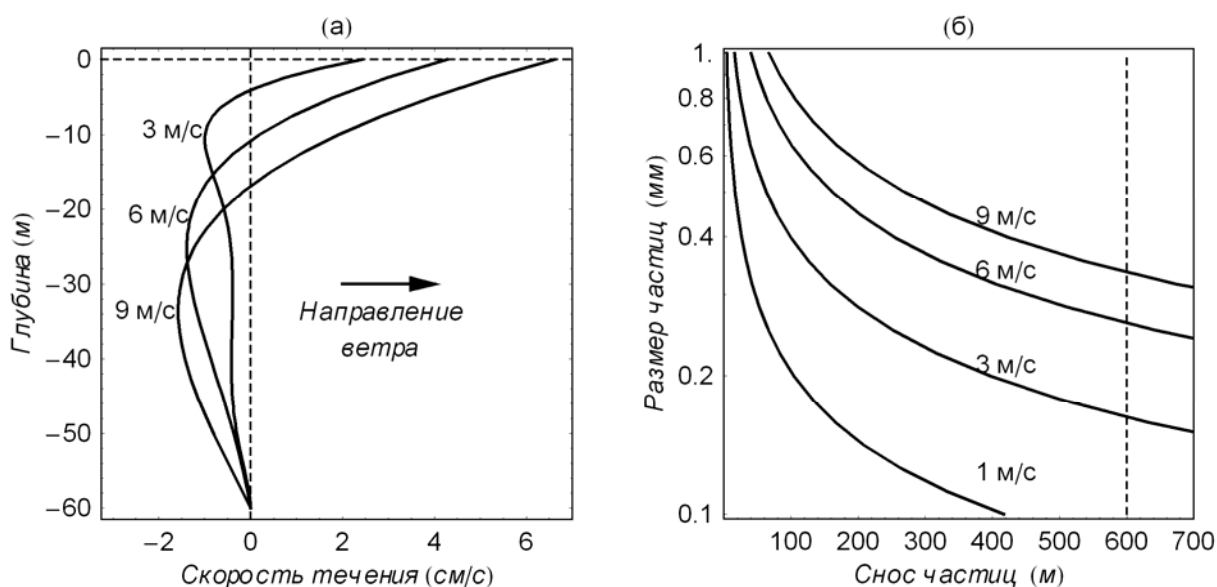


Рис. 3. Эпюры скорости ветрового течения (а) и снос частиц пепла (б) при различной силе ветра.

Видно, что даже при незначительном ветре, частицы мельче 0.2 мм выносятся за пределы кратера, имеющего диаметр около 600 м. Гранулометрический анализ пепла, собранного в пеплосборниках с поверхности снежников на берегу озера, показал, что медианный диаметр частиц пепла равен 0.18 мм. Следовательно, при скорости ветра большей 2 м/с, половина попавшего в кратер пепла будет вынесена в озеро. В кратере останутся крупные частицы пепла или его тяжелая фракция.

Более детальный анализ влияния течений на процессы накопления пепла в кратере Токарева может включать рассмотрение геометрии кратера (учет того, что кратер представляет собой воронку, а не плоское углубление) и влияние преобладающих ветров на перераспределение пепла в озере и кратере. Однако представляется, что эти поправки не изменят порядка оценочных величин.

Погрешности при интерполяции данных, полученных с помощью пеплосборников. Изложенные выше рассуждения приводят к выводу, что оценки количества попадающего в озеро пепла, основанные на данных пеплосборников, расположенных на берегу озера, могут быть существенно занижены. В этих оценках не учитывается перенос пепла с площади озерного бассейна и расхождение с истинным значением может составить 25%.

В то же время, интерполяция данных, полученных с помощью пеплосборников непосредственно на берегу кратера может давать завышенное количество пепла, попадающего на его дно. Даже при умеренных ветрах ошибка может быть весьма значительной – в разы отличаться от истинного значения.

Общий вывод таков: данные пеплосборников, установленных на берегу, следует использовать с осторожностью, поскольку на истинное количество пепла, попадающего в озеро оказывают сильное влияние метеорологические, климатические факторы и особенности рельефа. В этой связи представляются более надежными непосредственное измерение пепловых отложений на дне озера. Полезным был бы поиск химических маркеров, позволяющих отследить общее количество вулканического пепла, попадающего в озеро.

Оценки количества пепла попадающего в бассейн озера Карымского. В 2006 году на дне озера вблизи берега были установлены пеплосборники, показавшие, что в день на дно оседает $4.3 \cdot 10^{-3}$ кг/м² пепла. Это приводит к цифре $1.6 \cdot 10^4$ кг/год для всего озера, имеющего площадь 12.5 км². По оценкам В.И. Андреева, основанным на данных пеплосборников, установленных на берегу озера, в год в озеро попадает $1.3 \cdot 10^4$ кг пепла. Последние цифры представляются заниженными, поскольку они не учитывают перенос пепла с площади озерного бассейна.

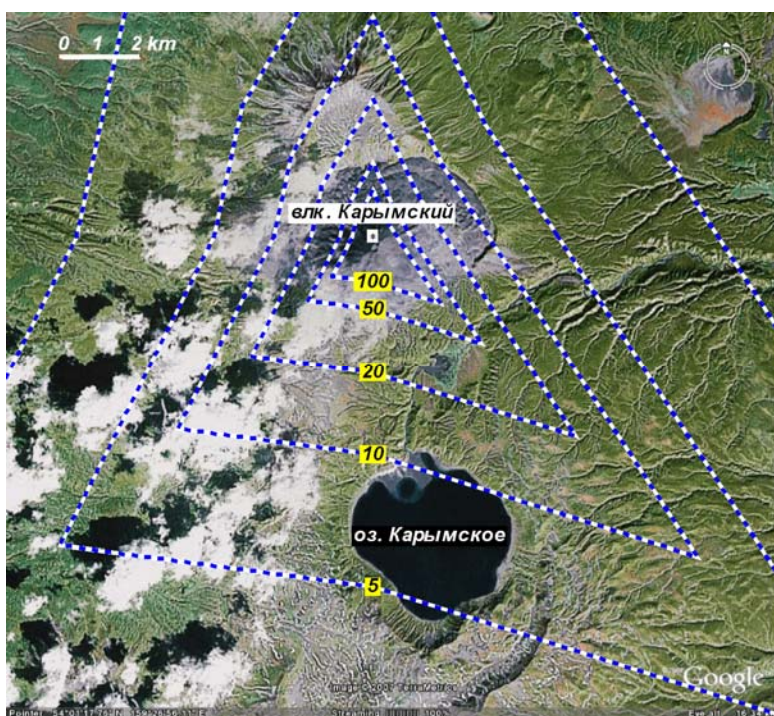


Рис. 4. Изолинии распределения массы пепла по площади (в кг/м²), в районе Карымского вулканического центра.

В июле 2006-го года Т.М. Жиделеевой и С.Б. Самойленко были проведены измерения количества пепла на поверхности и в толще снега в окрестности вулкана Карымского методом геохимической снегосъемки [2]. По результатам этих измерений можно построить изолинии распределения массы пепла, выпавшего в 2006 году, по площади (рис. 4). Оценка суммарного количества пепла на площади озера в момент отбора проб дает для июля 2006 года – $(4 \pm 2) \cdot 10^4$ тонн. Это количество пепла накопилось за 8 месяцев с момента установления снежного покрова. Таким образом, количество пепла, попадающего в течение года в воду озера Карымского оценивается нами в $(6 \pm 3) \cdot 10^4$ тонн.

Это завышенная оценка, предполагающая, что вулкан извергает пепел равномерно в течение года. Однако порядок величины представляется вполне достоверным.

Предварительные исследования вытяжек пеплов Карымского вулкана показали, что 100 г пепла в 1 л воды создают минерализацию порядка 50 мг/л. Следовательно, попадающий в озеро пепел приносит от 15 до 40 тонн минеральных веществ в год. Это на два-три порядка меньше, чем требуется для поддержания текущей минерализации воды в озере. Отсюда можно сделать вывод, что пепел Карымского вулкана оказывает слабое влияние на общую минерализацию Карымского озера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М: Мир, 1973. 758 с.
2. Жиделеева Т.М., Самойленко С.Б., Тембрел И.И., Эксплозивная деятельность Карымского вулкана в первой половине 2006 года // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. 28-30 марта 2007 г. Петропавловск-Камчатский. С.
3. Николаева А.Г., Карпов Г.А., Лупикина Е.Г. и др. Эволюция солевого состава воды термальных источников и Карымского озера после извержения 1996 г. // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. 30 марта – 1 апреля 2005 г. Петропавловск-Камчатский. С. 37-47.
4. Шулейкин В.В. Краткий курс физики моря. Л.: Гидрометеорологическое издательство. 1959. 477 с.
5. Ушаков С.В., Фазлуллин С.М. Морфометрические характеристики Карымского озера в связи с подводным извержением // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 130-138.
6. Федотов С.А., Муравьев Я.Д., Иванов В.В. и др. Извержения в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана в 1996-1997 гг. и их воздействие на окружающую среду // Глобальные изменения природной среды. Новосибирск. Издательство СО РАН НИЦ ОИГГМ. 1998. С. 127-145.