

**ОСОБЕННОСТИ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО И ГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ВЕЩЕСТВА БАССЕЙНА ОЗЕРА КАРЫМСКОЕ
В ПОСТКАТАСТРОФИЧЕСКИЙ ПЕРИОД (1996 – 2005 гг.)**

Карпов Г.А.¹, Николаева А.Г.¹, Лупкина Е.Г.¹, Бортникова С.Б.², Ушаков С.В.¹

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

² *Объединенный институт геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск*

Краткая информация о катастрофическом подводном извержении 1996 г.

В начале 1996 г. в районе Карымского вулканического центра произошло уникальное событие – одновременное извержение Карымского вулкана и подводное извержение в северной части кальдеры Академии Наук. Ему предшествовала повышенная сейсмическая активность в районе, длившаяся с весны предшествующего года. Непосредственно перед извержением произошло землетрясение с $M = 5.6$ (31 декабря 1995 г.) с эпицентром в Кроноцком заливе, находящемся приблизительно в 60 км к северо-востоку от Карымского вулкана, а часом позже – землетрясение с $M = 6.9$ в 25 км к югу от вулкана [11,15]. В течение последующего времени в этой зоне отмечался рой землетрясений с максимальной $M > 5.0$. Эксплозивное извержение вулкана Карымский началось 2 января 1996 г., а через короткое время (≈ 15 ч.) – подводное извержение в озере Карымское [11].

При аэровизуальных наблюдениях данной местности 2-3 января 1996 г. с расстояния 7 км отмечался газо-пепловый шлейф, тянущийся от вулкана Карымский в юго-восточном направлении в сторону Тихого океана. Из этого шлейфа выпадал вулканический пепел, покрывая территорию в сотни квадратных километров. В это же время с северной части Карымского озера поднимались парагазовые струи до высоты 7-8 км, нагруженные темным материалом, предположительно примесью пепла и озерных осадков [11]. Каждая серия подводных взрывов сопровождалась образованием волн на поверхности озера высотой до нескольких метров. Энергия единичных взрывов по максимальной высоте подъема газо-пепловых облаков оценивалась в 10^{14} Дж [15].

Подводное извержение в озере Карымское длилось меньше суток, но по удельному выносу вещества и энергии явно оказалось наиболее интенсивным, и его воздействие на окружающую среду было оценено как катастрофическое [11].

Изменения гидрологии и гидрохимии бассейна озера Карымское

В результате подводного извержения по р. Карымская, дренирующей озеро, прошел паводок. Широкая часть долины р. Карымская у основания вулкана и большая часть термальных выходов Карымских источников, находившихся в этой части долины, были заматы грязе-пеплово-каменным материалом.



Рис. 1. Образованный в 1996 г. полуостров Новогодный с кратером Токарева.

Изменилась гидрология бассейна самого озера Карымское. Прежде всего, изменилась морфология береговой линии озера. В северном секторе кальдеры Академии Наук за счет выброшенного при извержении материала образовался полуостров Новогодный (рис.1). Общий объем изверженного и резургентного материала, сформировавший полуостров, оценивается в 60 млн. m^3 . Из нескольких взрывных воронок разного диаметра, образовавшихся на полуострове, долгое время поднимались плюмы фумарольных газов. В истоке реки Карымская появились горячие источники (Пийповские).

Береговая часть озера также лишилась снежного покрова и была покрыта

грязевым материалом и продуктами извержения. Во многих местах на берегу можно было наблюдать оползни, размывтый грунт и участки, лишенные дерна. До 11 мая 1996 г. стока воды из озера в р. Карымская не происходило, т.к. материал извержения закупорил исток своеобразной плотиной. Уровень воды в озере поднялся на несколько метров.

Во второй половине января 1996 г. были выполнены некоторые гидрохимические работы на озере: замеры $T^{\circ}C$, pH, отбор проб воды на определение химического состава. Все озеро было лишено ледового покрова, температура воды в нем составляла 22-28 $^{\circ}C$ [14]. Водная масса озера в результате механического воздействия была перемешана.

Как известно, до извержения 1996 г., вода Карымского озера была пресной (pH = 7.1), низкоминерализованной ($M = 110-130$ мг/л), имела $HCO_3^- - Na$ состав и практически не восстанавливалась [8,13]. В 1993 г. при проведении полевых работ в районе северной части озера были отобраны и проанализированы единичные пробы озерной воды. Но так как общая минерализация воды была невысокой, то должного внимания увеличению таких критериальных компонентов как Cl^- , B , в меньшей степени S , в обратном порядке - HCO_3^- не было уделено, хотя они предположительно являлись предвестниками готовящегося события (таблица 1).

Таблица 1. Химический состав воды Карымского озера в 1984 г., 1993 г. и 1996 г.

Дата отбора	pH	$T^{\circ}C$	Химический состав, в мг/л:													Сумма
			Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Fe общ.	Mn^{2+}	Al^{3+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	F^-	H_4SiO_4 общ.	H_3BO_3	
19.06.84*	3.5	7.05	10.4	1.6	1.6	0.5	-	-	-	8.5	3.8	35.1	0.06	45.0	0.1	109.6
30.08.93**	12.0	7.45	14.0	0.8	6.0	0.6	0.002	0.006	0.0002	21.3	4.8	22.0	0.1	48.0	0.5	140.0
22.01.96***	3.67	20.0	74.3	7.6	64.0	17.2	-	-	-	57.8	317.0	0.0	-	189.0	0.6	727.5

Примечание: * - по данным [13]; ** - по данным [14], *** - проба отобрана в северном секторе кратера Токарева Г.А. Карповым. Аналитик С.В. Сергеева (Институт вулканологии ДВО РАН); "-" – нет данных

Во время подводного извержения в озеро поступило огромное количество эндогенных химических компонентов, газов и выброшенного взрывами вулканогенного и резургентного материала. По расчетным определениям в воду озера поступило около 1 млн. т растворенного вещества - Cl , S , F , Na , Ca , Mg , Si , Fe , Mn . В связи с этим пресное до извержения озеро практически за мгновение в геологическом плане время превратилось в водоем с кислой водой (pH = 3.2) $Cl-SO_4 - Ca-Na$ состава и с общей минерализацией около 1.0 г/л. В пробе озерной воды, отобранной сразу после извержения, наблюдалось резкое возрастание содержания Na , K , Mg , Cl , F , B , Si и SO_4^{2-} . Помимо этого, в воде озера также фиксировались довольно высокие концентрации Zn , Ni , Mn , Cu , Al и Sr [14]. Вся ихтиофауна (коканы) в озере погибла, зоо – и фитопланктон докатастрофического периода не обнаружен. По словам очевидцев в январе 1996 г. на берегу в приустьевой части р. Карымской наблюдались огромные скопления мертвой рыбы, жабры которой были забиты пеплом. Это была настоящая природная катастрофа.

Прорыв запруды в мае 1996 г., гидрохимия Карымского озера и реки

11 мая 1996 г., вследствие таяния снега, уровень воды в озере стал быстро подниматься. В середине мая вода озера стала переливаться через борт запруды в районе старого истока р. Карымской и нарастающий по расходу водоток пробил себе путь в запруде, что привело к образованию паводка, сравнимого с январским. В результате разрушения плотины уровень воды в озере снизился ~ на 3.2 м. Объем сброшенной через р. Карымская воды составил ~ 35 млн. m^3 . Расход воды в истоке р. Карымской (створ –I) в этот период достигал 400 m^3/c . Мощный вал воды, песка, ила докатился по руслу реки Карымской до побережья Кроноцкой бухты, и в устье реки отложился на второй террасе 0.3 м слой этого материала.

В летний сезон 1996 г. наблюдалось постепенное падение уровня озера до отметки 624.15 м. К середине августа 1996 г. в истоке реки расход озерной воды составлял около 3.8 $m^3/сек$, на створе ниже Карымского стационара – около 9 $m^3/сек$. Вода в истоке имела pH – 3.30, ниже стационара pH колебался около 6.3, хотя солевой состав воды формировался более, чем на 50% за счет воды озера. Вода в реке содержала: Cl^- – 60 мг/л, SO_4^{2-} – 250 мг/л, Na – 80 мг/л, K – 7 мг/л, Ca – 54 мг/л, Mg – 39 мг/л, Fe – 1.6 мг/л [2].

Тонко-мелкообломочный каменный материал, вынесенный из озера Карымское двумя паводками – в начале извержения и 16 мая при прорыве плотины, в значительной степени осел на километровом участке широкой долины реки Карымской, начиная с 800 м от ее истока. Здесь

мощность наносов составляет 0.7-1.5 м. Под слоем грязи, пепла, шлаков и резургентного материала дна и бортов озера оказалась погребенная масса ольхового стланика, произраставшего в долине реки. На первой террасе Карымского озера, в юго-восточном его секторе, образовались обширные завалы из стволов вырванного с корнем и срезанного ударными волнами кедрового и ольхового стланика, суммарный объем которых оценивается нами в 5000 м³.

Окрестности вулкана Карымского были засыпаны пеплом (который поступает от извергающегося вулкана до сих пор). Талой водой пепел сносится в бассейн реки Карымской. Соответственно, из пепла выщелачиваются макро- и микрокомпоненты.

По данным анализа водной вытяжки в пробе пеплов андезито-дацитового состава Карымского вулкана, отобранной 3 января 1996 г. содержалось (мг/л): Н⁺ - 0.42; Na⁺ - 133.4; K⁺ - 23.5; Ca²⁺ - 872.0; Mg²⁺ - 54.4; Fe²⁺ + Fe³⁺ - 24.0; Cl⁻ - 163.5; F⁻ - 12.6; SO₄²⁻ - 2643.0; рН = 3.07. В водно-растворимом комплексе пеплов превалирует SO₄, а также Ca, Na и Mg. Естественно, раствор имел кислую реакцию, кстати, очень близкую к той, которая наблюдалась в озере сразу после подводного извержения 1996 г.

В озерной воде после извержения резко снизилось содержание растворенного кислорода (в марте 1996 г. оно было в 4 раза, а в июне 1996 г. в 2 раза ниже нормы). В составе растворенных газов наблюдалось повышенное содержание CO₂, углеводов.

По результатам наших экспериментов с подводными ловушками в акваторию Карымского озера в 1999 г. попадало порядка 100 т пепла в сутки от извергавшегося Карымского вулкана. Поступление в воду озера сульфатной компоненты, на наш взгляд, связано как с попаданием в акваторию озера большой массы пеплового материала от извергающегося вулкана Карымского, так и с латеральным стоком с бортов кальдеры, растворением в воде озера части флюидной компоненты от самого подводного извержения и подводными разгрузками на дне озера.

Нами в составе окклюдированных газов вулканических бомб с полуострова Новогодного был обнаружен SO₂. В составе минеральных продуктов постмагматической стадии деятельности в одной из взрывных воронок в северном секторе озера нами обнаружены: самородная сера, сульфаты – гипс, кокимбит, вольтаит, галотрихит-пиккерингит, алуноген, эпсомит, а также свободная серная кислота [3].

Динамика изменения гидрохимических параметров воды озера Карымское

В 1996-1999 гг. на Карымском озере проводилось биогидрохимическое опробование лишь поверхностной воды озера, термальных источников и осадков. Результаты исследований 1996-97 гг. отражены в работах [2,3,7,9,10,14]. С 2000 г. по двум вертикальным профилям производилось режимное батиметрическое опробование.

В мае 1996 г. на новообразованном полуострове Новогодном появился ручей Горячий в истоке р. Карымской и обнаружили высачивания горячей (до 72°C) минерализованной воды в пляжной зоне северного сектора кратера Токарева.

В период наблюдений 1996-2005 гг. было отмечено постепенное распреснение вод озера. Эта тенденция хорошо отражена на рис. 2, где показаны вариации содержания Na, K, Mg, Ca, Cl, SO₄²⁻, HCO₃⁻ и общей минерализации в вертикальном профиле Карымского озера. Уже к 2000 г. заметно уменьшилось содержание Mg и Ca как в акватории озера, так и в кратере Токарева. К 2005 г. общая минерализация воды и вовсе сократилась примерно в 2 раза. Следует отметить тенденцию сохранения повышенного содержания всех компонентов и общей минерализации в придонных слоях озера. Заметный перепад в содержании практически всех элементов и соответственно общей минерализации происходит в интервале глубин 10-20 м (см. рис. 2).

По данным гидрохимического профилирования озера в 2001 г. картина распределения содержания в воде Na, K, Cl и SO₄ имела сложный характер [12]. Так, для Na обнаружилась своеобразная линза повышенных значений в центре акватории озера. Распределение K аналогично Cl и SO₄.

Распределение температуры, по данным батиметрических измерений, проводимых обычно в июле-августе, имеет более-менее равномерный линейный характер. Наблюдается четкая тенденция понижения температуры с глубиной как в акватории озера, так и в кратере Токарева. Но в акватории озера линейная стратификация нарушается некоторым повышением температуры (0.1-0.3°C) в придонной зоне, а в кратере Токарева, и особенно в районе его южного борта наблюдались незакономерные вариации температуры. По нашему мнению это связано с наличием подводных очагов разгрузки гидротерм.

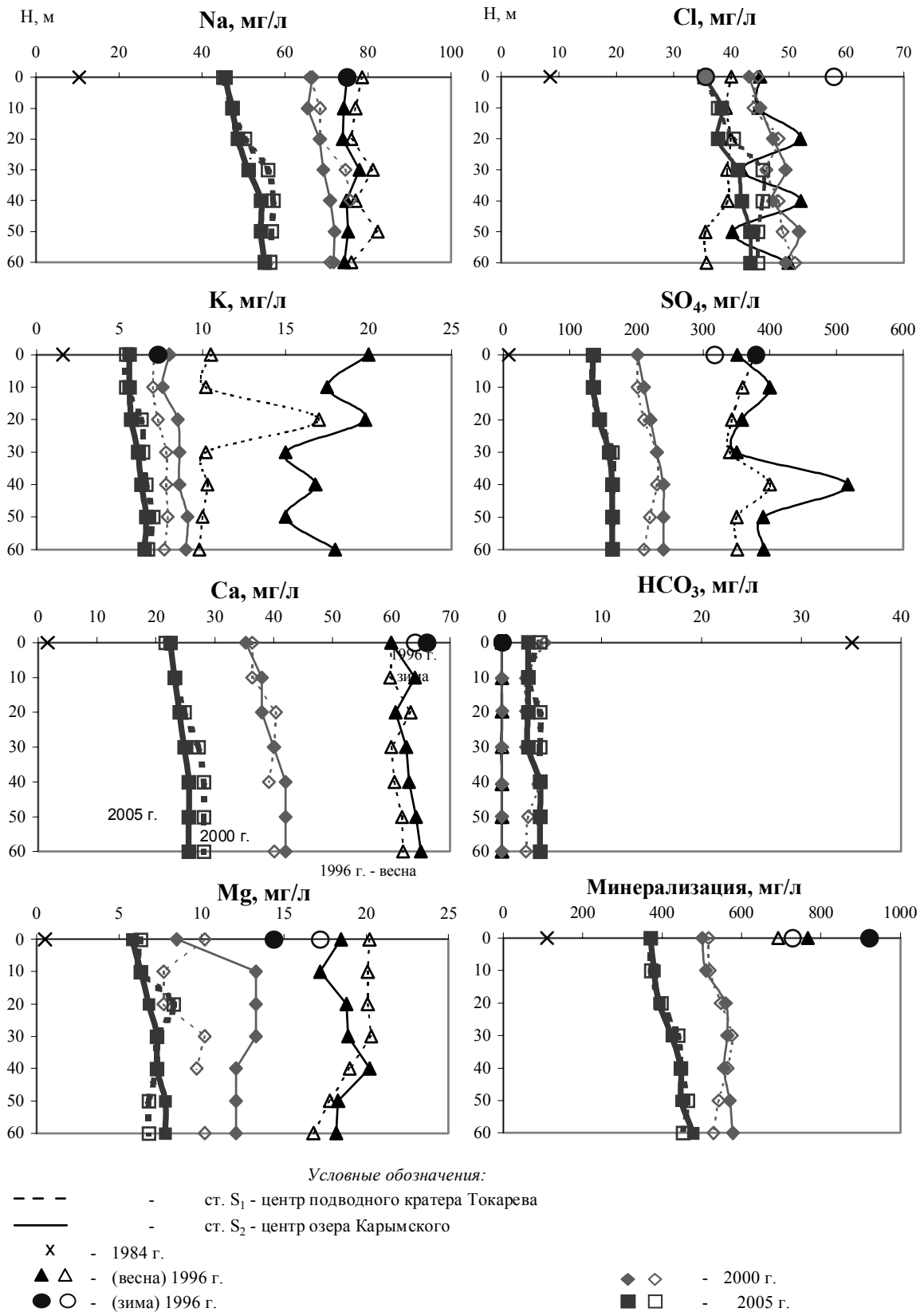


Рис. 2. Динамика изменения солевого состава оз. Карымское по данным режимных наблюдений на станциях S₁ и S₂ за 1984 – 2005 гг.

В общем, к осени 2005 г. наблюдалась тенденция опреснения озера. Минерализация воды и в кратере Токарева, и в центре озерной чаши понижалась синхронно. Водородный показатель pH, наоборот, постоянно возрастал и приблизился к 6.0.

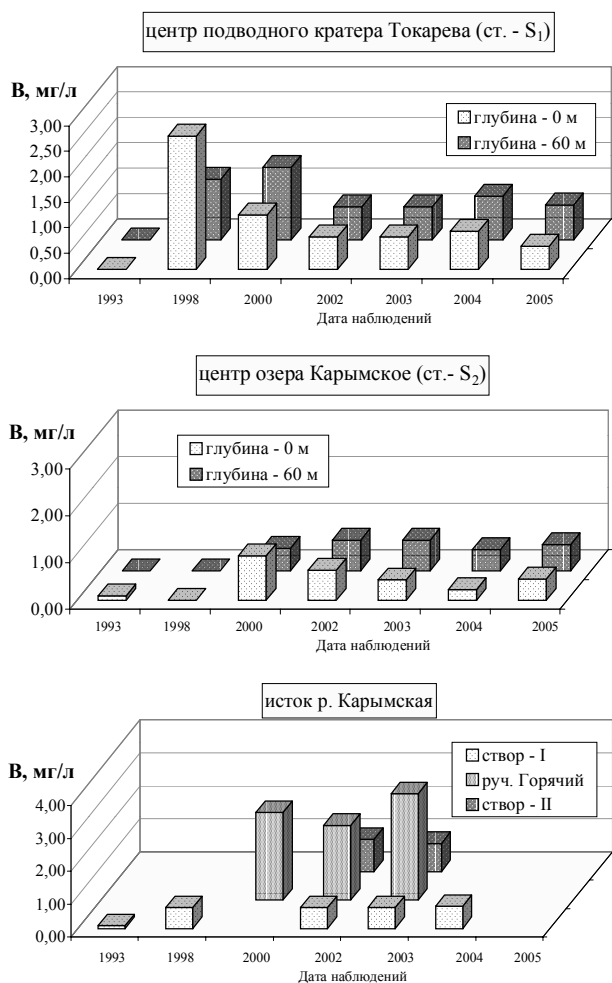


Рис. 3. Динамика содержания В в воде оз. Карымское по данным наблюдений за 1993 - 2005 гг.

обнаружены нами в 2000 г. в бортах кратера Токарева.

Металлоносная составляющая термальных вод и концентрационная функция минеральных осадков и биоты

Гидрогеохимия термальных вод кальдеры Академия Наук

В кальдере Академии Наук, большую часть которой занимает Карымское озеро, до извержения 1996 г. были известны только проявления кипящих субщелочных гидротерм (гейзера и источников) хлоридно-натриевого состава – источники Академии Наук [4,5,13]. Они находились в южном секторе озера, почти у уреза воды. После фреато-магматического извержения 1996 г. появилась новая группа источников и новый гейзер западнее существовавших ранее источников Академии Наук, а также выходы субнейтральных источников сложного Cl-SO₄-Ca-Na состава, с температурой 50-97°С в северном секторе озера, в обрамлении подводного кратера Токарева, а также многочисленные термопроявления в северо-восточном (источники «Медвежьи») и юго-юго-восточном секторах озера – источники Береговой, Сердитый и др. [2,6,12].

Показательно, что в субщелочных термах, существовавших до подводного извержения 1996 г., практически нет Mg, в то время как в субнейтральных, и в воде, ставшего кислым после извержения озера, Mg присутствует в значительном количестве. Напрашивается вывод о едином источнике солевого питания для новообразованных источников и минерализации озера, т.е. они, по-видимому, обусловлены потоком магматических флюидов, связанных с очагом базальтового расплава. Об эндогенной компоненте свидетельствует и довольно высокое содержание В и Cl. Сульфатность вод, по-видимому, обеспечивается реакциями окисления серосодержащих соединений.

Очень интересна минерализация воды ручья «Горячего». Ручей Горячий берет начало под новообразованной бомбо-шлаковой террасой южнее истока р. Карымская и объединяет множество

Аномальные содержания бора в воде озера Карымское

Имеющаяся к настоящему времени база гидрохимических данных по содержанию солевых компонентов в вертикальном профиле воды озера Карымское позволяет отметить аномальное распределение метаборной кислоты.

На рис. 3 хорошо видно, что в кратере Токарева содержание H₃BO₃ более-менее равномерное по всей глубине, синхронно изменяется с годами, с тенденцией постепенного снижения. В центральной же части озера (станция S₂), начиная с 2002 г. наблюдаются значительно более высокие содержания H₃BO₃ на глубине 60 м.

Сравнительная характеристика содержания H₃BO₃ в воде реки Карымской, в ее истоке, и на створе II, который находится ниже устья ручья Горячего, показала, что существенное повышение концентрации бора в воде связано с поступлением его с более минерализованными термальными водами ручья Горячего (см. рис. 3).

Таким образом, можно более-менее определенно предполагать наличие и на дне озера очагов разгрузки термальных вод, подобных, а вероятно и более мощных тем, которые были

почти кипящих источников ($t \sim 70-92^{\circ}\text{C}$), выходящих по трещинной зоне в основании этой террасы. Отмечено, что в ручье Горячем температура колеблется в течение года от 50 до 76°C . В русле этого ручья обильно развиваются термофильные микроорганизмы, также испытывающие периодический расцвет и приходящие в угнетенное состояние при повышении температуры. По физико-химическим характеристикам и по ассоциации микробиоты ручей Горячий подразделяется на два биотопа – 1) теплая, мелководная зона верховий ручья (глубина $0.1-0.2$ м; $t = 10-18$, (26°C); $\text{pH} = 6.8-7.0$ ($10-11$) и 2) высокотемпературная средняя зона ручья (глубина $0.4-0.5$; $t = 60-73^{\circ}\text{C}$; $\text{pH} = 7.3-7.7$). Оба биотопа с самого возникновения ручья в 1996 г. характеризуются интенсивным развитием специфической ассоциации микроорганизмов. Геохимические особенности воды, биоты и минеральных осадков в этих локальных ассоциациях показаны в таблице 2.

Таблица 2. Содержания микроэлементов в термальной воде, микробиоте и минеральных осадках различных биотопов (мг/кг) и их коэффициенты обогащения

Элемент	Биотоп № 1						Биотоп № 2					
	Вода	Биота	Осадок	K_1	K_2	K_3	Вода	Биота	Осадок	K_1	K_2	K_3
Ti	0.006	556	0.36	92666	1544	60	0.006	766	0.54	127666	1418	90
Mn	0.11	508	0.11	4618	4618	1	0.14	539	0.13	3850	4146	1
V	0.005	37	129	7400	0.3	25800	0.005	59	202	11800	0.3	40400
Zn	0.01	2764	67	2740	0.4	6700	0.03	35.7	82.0	1190	0.4	2733
Pb	0.005	1366	4.46	2720	3.0	892	0.005	15.7	10.6	3140	1.5	2120
Cu	0.001	2469	64.0	24900	0.4	64000	0.001	37.8	71.0	37800	0.5	71000
Cd	0.0004	0.225	0.21	562	1.1	525	0.0004	0.37	0.06	925	6.1	150
Sr	0.13	360	420	2769	0.8	3230	0.13	343	430	2638	0.8	3307
As	0.05	57.0	0.28	1140	203.6	5.6	0.09	65.0	11.4	722	5.7	122
Ni	0.0003	11.6	26.3	38666	0.4	87666	0.0003	44.6	37.7	14866	1.2	125666
Br	не опр.	2.81	1.07	-	2.6	-	не опр.	4.11	1.72	-	2.4	-
Ag	не опр.	0.36	0.08	-	4.5	-	0.00001	0.24	0.36	-	0.7	-

Примечания: Анализы выполнены методом ICP-MS в Аналитической лаборатории Объединенного института геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск. K – коэффициент обогащения (концентрационная функция): K_1 – отношение содержания элемента в массе микробиоты к его содержанию в воде; K_2 – то же к содержанию этого элемента в донном минеральном осадке; K_3 – отношение содержания элемента в осадке к его содержанию в воде. «не опр.» – содержание элемента ниже чувствительности метода анализа; «-» – отношение не рассчитывалось.

В ручье Горячий практически круглый год наблюдаются маты сине-зеленых водорослей с доминирующим положением форм *Mastigocladus luminous* и некоторых видов *Phormidium*. Оптимальными для них являются температура около 56°C и pH порядка $5.5-6.0$.

Из таблицы 3 следует, что биотопы слабо различаются по содержанию микроэлементов в воде, но биота более высокотемпературного и щелочного биотопа № 2 более обогащена относительно воды такими элементами как Ti, Cu, Ni, V, являющимися типоморфными для магматических пород основного состава. Заметно повышенное содержание в исследованных биоценозах Mn, Zn, Pb, Sr, As, Cd.

Рассчитанные коэффициенты обогащения показывают, что та же закономерность наблюдается и для минеральных осадков, однако Ti в них на три порядка меньше, чем в альгобактериальном мате. Кроме того, в осадках обоих локальных биотопов прослеживаются более высокие, чем в "матах" содержания V, Zn, Cu, Ni, т.е. тех микроэлементов, которые характерны для изверженных пород, что может свидетельствовать о повышенной роли пирокластики в осадконакоплении этих биотипов. Следует отметить, что в силу большой динамики погодных условий в этом районе (сильные ветры, обилие атмосферных осадков и др.) верхняя часть биотических матов и осадков часто подвергается разрушению и сносу. Тем не менее, выявленные нами закономерности, общие для обоих биотопов, скорее всего характеризуют концентрационную функцию биоты.

Минеральная специализация термальных вод района исследований хорошо проявляется в обогащении микроэлементами массы термофильных водорослей, обычно развивающихся в этих термальных источниках (табл. 3). В целом, биота обогащена относительно осадка такими элементами как Ti, Mn, As, Pb, Br, Ag (Ni в высокотемпературном биотопе), что, по-видимому, отражает повышенную миграционную способность этих элементов в растворах ручья Горячий и

их постмортальную сорбцию (или прижизненное потребление) развивающимся в этих условиях комплексам биоценозов. Следует обратить внимание на интенсивное извлечение из раствора как биотой, так и осадком в целом, такого токсичного элемента как Cd, а также существенное накопление в них Sr, Br, Ag и особенно As (в биоте).

Таблица 3. Содержания металлов в термофильных водорослях бассейна оз.Карымское в 2002 г., г/г

№ пробы	ГИ-7	ГИ-8	Мд-2	АН-21	Н-1	№ пробы	ГИ-7	ГИ-8	Мд-2	АН-21	Н-1
Ti	766	235	378	441	381	Sr	343	178	277	276	200
V	59	19	34	31	8.9	Y	29.8	10.2	19	27.6	7.43
Cr	25.3	16.7	12.4	-	22.5	Zr	136	59	115	152	58
Mn	539	355	286	383	398	Nb	2.31	0.95	2.34	2.98	1.54
Fe	45993	17056	17841	17795	138661	Mo	12.5	1.22	1.28	0.592	0.759
Ni	44.6	8.72	2.14	3.63	8.93	Ag	0.244	0.123	0.198	0.287	0.347
Cu	37.8	18.9	21.3	14.8	11.6	Cd	0.374	0.32	0.223	0.179	0.231
Zn	35.7	18.9	24.4	30.1	10.6	Sn	3.09	1.27	0.749	1.66	0.732
Ga	13.2	5.16	12.5	42.9	2.55	Sb	0.95	0.21	4.11	12.5	1.2
Ge	3.01	35.4	3.67	5.21	0.086	I	3.51	119	13.2	5.21	9.38
Br	4.11	25.3	18.9	7.29	2.28	Pb	15.7	9.4	9.57	9.25	28.6
Rb	25.1	63	20.9	67	10.1	As	65	42	38.3	34.5	681

Примечание: Номера проб по сборам С.Б. Бортниковой. Структурообразующий комплекс проб ГИ-7, ГИ-8 представлен *Mastigocladus laminosus*, *Synechococcus elongates*; Мед-2 - *Phormidium*, sp.sp.комплексы в пробах АН-21, Н-1 не определялись; "-" - нет данных. Места отбора: ГИ-7 – ист. 1 р. Горячий (55-78°C); ГИ-8 – исток р. Горячий (15-25°C); Мд-2 – ист. Медвежий (37-52°C); АН-21 – исток ручья старого гейзера АН (50-80°C); Н-1 – ванна нарзана (37°C).

Таким образом, микробиота в термальных биотопах является своеобразным фильтром микроэлементов, очищающим воду. В частности, для исследованных биотопов видно, что чем выше температура (до пределов развития биоты) и водородный показатель рН, тем выше концентрационная функция микробиоты.

Геохимические особенности изверженных пород и минеральных осадков в озере Карымском и термальных источниках района

В процессе седиментации в бассейне Карымского озера значительный объем занимают пеплы андезитового состава, поступающие от продолжающегося извергаться Карымского вулкана. Кроме того, в озеро идет снос терригенного материала с крутых бортов кальдеры и аллювия с водами ручьев и временных водотоков, впадающих в озеро. Определенный вклад в осадкообразование вносит и гидротермальная деятельность как в самом озере, так и по его периферии (источники Академии Наук, Береговые, Пийповские, Медвежьи и др.). Скорость накопления донных осадков в глубоководной части озера оценивается нами порядком 5-7 см в год. По данным нашего эксперимента с осадкоулавливателями в 2004 г. скорость осадконакопления в юго-юго-восточном секторе подводного кратера Токарева (в зоне подводной разгрузки гидротерм) при слабой активности Карымского вулкана составляет не менее 8.6 г/м² в сутки.

По данным драгирования и опробования с помощью грунтовой трубки на дне основной акватории озера (глубиной до 60 м) находится неконсолидированный песчано-иловый осадок мощностью 40-50 см, средний состав которого (по данным опробования 2000 г.) следующий (мас.%): SiO₂ – 56,82; TiO₂ – 0.92; Al₂O₃ – 17.04; Fe₂O₃ – 4.11; FeO – 4.08; MnO – 0.18; MgO – 2.58; CaO – 5.26; Na₂O – 2.82; K₂O – 1.20; H₂O⁻ - 0.98; H₂O⁺ - 0.0; n.n.n. – 3.51; P₂O₅ – 0.23; SO₃ – 0.30; Cu – 0.0064; V – 0.0014; Hg – 0.00004. На дне новообразованного кратера Токарева (глубина 56 м) формируется толща осадков, в основании которой залегает грубозернистый песчано-шлаковый (с бомбами до 20-30 см) материал. Песчано-шлаковый осадок имеет средний состав базальта (мас.%): SiO₂ – 54.62; TiO₂ – 0.86; Al₂O₃ – 19.72; Fe₂O₃ – 3.24; FeO – 5.46; MnO – 0.13; MgO – 2.91; CaO – 7.35; Na₂O – 2.53; K₂O – 0.80; H₂O⁻ - 0.99; H₂O⁺ - 0.0; n.n.n. – 1.10; P₂O₅ – 0.23; Cu – 0.058; V – 0.0078; Co – 0.0015; Ni – 0.001; Zr – 0.025; Cr – 0.0034; Sr – 0.058. На нем накапливается ил, включающий, в основном, пеплы алевритового состава.

Как в акватории, так и в кратерной зоне озера в толще осадков наблюдаются 3-5 миллиметровые прослои, иногда линзы, с раздувами до 2 см, существенно обогащенные

тонкодисперсными окислами железа. Они четко выделяются в разрезе своим охристым цветом. Нередко эти слои имеют следы деформаций типа «волновой ряби», что может свидетельствовать о наличии придонного течения, возмущения от выходов газов, либо о консолидации осадков. Состав обожженных слоев следующий (вес.%): SiO₂ – 32.56; TiO₂ – 0.44; Al₂O₃ – 9.92; Fe₂O₃ – 14.26; FeO – 6.45; MnO – 0.04; MgO – 1.30; CaO – 2.64; Na₂O – 1.80; K₂O – 0.48; H₂O⁻ - 2.50; H₂O⁺ - 0.0; n.p.n. – 24.02; P₂O₅ – 0.45; S (определено в форме SO₃) – 3.48. Кроме того, в осадке определены Cu – 0.01%; V – 0.018%; Co – 0.003% и 1,7·10⁻⁴ Hg. Обращают на себя внимание высокое содержание железа и высокое значение потери при прокаливании (n.p.n.) в осадках. Микробиологи в этих слоях обнаружили процесс анаэробного микробиологического восстановления железа, что выражается в формировании тончайших слоев черного цвета. В обожженных слоях также отмечается до 1000 клеток в см³ бентических диатомовых водорослей докатастрофического периода. По-видимому, высокое значение n.p.n. связано с содержанием органики в осадках. Что касается железа, то мобилизация его из магматических пород кислыми озерными водами (pH 3.2-4.7), перевод во взвесь на щелочных барьерах (при смешении с пресными водами ручьев и на органическом субстрате) и последующее осаждение на дно существенно изменяют марганцевый модуль (ММ) осадков (ММ ≤ Mn/Fe). Так, в подводном кратере Токарева на субстрате андезитового и базальтового состава с классическим ММ = 0.019 формируются песчано-илистые осадки с железистыми прослоями, в которых ММ = 0.043-0.084. В осадках остальной акватории озера содержание марганца еще выше (до 0.086%) и ММ = 0.085-0.14. В то же время в прибрежных осадках, формирующихся за счет сноса глинистого материала из зон гидротермальной аргиллизации и его смешения со взвесью тонкодисперсного охристого вещества, обогащенного железом, наблюдается максимально низкий модуль, равный 0.0018-0.0028. Таким образом, одновременно в одном и том же бассейне формируются донные отложения с крайне различным содержанием железа и марганца. К тому же подмечено, что именно с участками, где ММ имеет повышенные значения, связаны выходы азотного газа. В кратере Токарева к таким участкам тяготеют и колонии термофильных микроорганизмов. Подмечено, что с исчезновением этих колоний в 2001 г., возможно засыпанных пеплом при активизации Карымского вулкана, или, наоборот, с падением активизации, перестали работать и выходы азотных газов.

В таблице 4 приведены результаты анализов содержания микроэлементов в описанных донных осадках из зон подводных разгрузок гидротерм, в возгонах и осадках на ручье Горячий.

Таблица 4. Геохимия изверженных пород, минеральных осадков, илов и возгонов из района Карымского вулкана и Карымского озера

Номер пробы	%				г/т												
	K	Ca	Ti	Fe	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Cd	Sb	As	Sn	Cs
Kar-1996	0.39	1.23	0.35	3.9	93	н.о.	8.26	23.4	71	24.5	21	390	0.1	0.36	н.о.	1.12	н.о.
Kar-1997	0.33	1.1	0.35	3.8	114	н.о.	10.9	32.5	66	20.4	23.4	356	0.05	0.45	н.о.	1.56	н.о.
Kar-1998	0.58	1.2	0.38	4.2	134	н.о.	7.6	32.2	78	25.7	22.6	372	н.о.	0.64	н.о.	1.34	н.о.
Kar-1999	0.49	1.11	0.34	3.7	96	н.о.	8	26.4	63	23.2	21.6	363	0.31	0.3	н.о.	1.83	н.о.
Kar-2002	0.46	1.47	0.41	4.7	111	11.3	5.3	34.4	87	23.9	22.7	410	0.03	0.27	н.о.	1.75	н.о.
002-S	0.69	1.59	0.36	5	65	н.о.	8.7	84	59	20.9	22.9	294	0.74	32.7	н.о.	1.1	н.о.
4425	0.88	1.68	0.23	2.9	102	28	25.4	49.2	59	9	28.6	210	0.19	13.8	16.1	0.62	31.6
4419	0.92	2.65	0.37	12.2	146	485	82	211	73	4.4	21	237	0.2	10.8	576	4.74	4.6
4086	0.69	6.44	0.42	9.4	147	261	64	81	74	12	10.4	421	0.28	-	733	0.33	4.6
4087	1.01	6.04	0.44	5.1	120	71	36.3	59	76	13.3	16.1	419	0.11	0.24	105	0.86	5.2
4520	0.68	4.87	0.05	4.6	32.5	-	22.4	42.1	33.6	5.5	22.5	266	0.28	-	22.3	0.72	4.7
4521	0.63	2.46	0.14	20.3	91	596	66	33.2	34.8	10.7	27.7	119	0.22	0.4	7.6	0.52	11.6
4523	1.22	4.91	0.53	6.1	132	81	29.1	90	98	15.8	21.3	401	0.37	1.11	75	0.62	6.11

Примечание: Отбор проб осадков производился Г.А. Карповым. Место и время отбора: 002-S –ил в зоне разгрузки терм, кратер Токарева, h=8м, 2002 г.; 4425 – литиф. пепел, северный сектор кратера Токарева; 4419 – донный ил, кратер Токарева, центр, h=58м, 2002 г; 4086 - охристая коронка, руч. Горячий, центр, t=76°C 1997; 4087 - возгоны квасцов, средн. часть руч. Горячий, 1997 г; 4520 – там же, 2003 г; 4521 – осадок зеленого цвета, дно ручья Горячего, 2003; 4523 - ил серого цвета, кратер Токарева, h=12м, 2002.

Пробы андезитов любезно предоставлены А.Ю. Озеровым. Анализы на ICP-MS выполнены в Объединенном институте геологии и минералогии СО РАН г. Новосибирска. "н.о." – проба не определялась.

Для сравнения дан анализ содержания тех же элементов в литифицированных пеплах Карымского вулкана, вещество которого и слагает, в основном, донные осадки Карымского озера, а также в свежих андезитах разных лет извержения Карымского вулкана (Каг-1996-2002).

Видно, что типоморфные элементы изверженных пород андезитового состава (вулканических бомб и пеплов) – Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Cd, Sb и в осадках имеют преобладающее значение. Особенно обогащены донные илы (состоящие, в основном, из пепловой составляющей), такими халькофильными элементами как Cu, Zn, As, в меньшей степени – Sb, Pb. Довольно значительно во всех типах осадков и содержание элементов, характерных для основных пород – Ti, V, Cr, Ni. Можно предположить, что последние выщелачиваются кислыми озерными водами из базальтового субстрата кратера Токарева и полуострова Новогоднего, ресурсный потенциал которого относительно этих элементов достаточно велик. Следует обратить особое внимание на то обстоятельство, что в донных осадках (наиболее заметно – в ручье Горячий) происходит накопление радиоактивных элементов – U и Th и соответственно наблюдается повышенная эманация Rn [1].

Заключение

Комплексные биогидрохимические исследования последствий катастрофического подводного извержения в кальдере Академии Наук (озеро Карымское) и продолжающегося 10 лет извержения Карымского вулкана, позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Фреато-магматическим подводным извержением 1996 г. в северном секторе кальдеры Академии Наук экосистема пресноводного озера Карымское была резко выведена из состояния равновесия. Восстановление ее происходит медленно как из-за геолого-морфологических особенностей озера, так и в связи с продолжающимся поступлением в этот бассейн ингибирующих компонентов с эндогенным флюидом (береговые и подводные разгрузки гидротерм, боковые породы) и с пеплом извержения Карымского вулкана.
2. Кислотность вод Карымского озера связана с выщелачиванием серосодержащих компонентов (в том числе окклюдированных газов) из базальтового субстрата новообразованных кратера Токарева и полуострова Новогоднего, а так же пепла Карымского вулкана. В бассейн озера в периоды активизации вулкана поступает порядка 100 т пепла в сутки (по данным 1999 г.).
3. По данным батиметрии озера наблюдается стратификация воды по ряду компонентов и по температуре в вертикальном и горизонтальном профилях озера, связанная с морфологическими особенностями озерного бассейна и подводной разгрузкой гидротерм.
4. Отмечено массовое развитие альго-бактериальных матов в термальных источниках при высоком содержании в термальной воде токсичных тяжелых металлов.
5. В пределах очагов разгрузки гидротерм ручья Горячего выделены два биотопа, различающиеся по температуре, макро- и микросоставу компонентов в воде и биоте. Рассчитана концентрационная функция биоты. Сделан вывод о своеобразной фильтрующей (очищающей) роли микробиоты, причем, чем выше температура (до пределов развития биоты) и pH растворов, тем выше концентрационная функция термофильной микробиоты.
6. В донных осадках кратера Токарева в настоящее время происходит процесс седиментации, с накоплением в осадках прослоев, в разной степени обогащенных железом и марганцем. На причины этого явления необходимо обратить внимание при дальнейших исследованиях.

Список литературы

1. Андреев В.И., Карпов Г.А. Радон в спонтанных газах гидротермально-магматической системы кальдеры Академии Наук / Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога 30 марта – 1 апреля 2005 г., г. Петропавловск-Камчатский. С. 47-52.
2. Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф. Гидротермы Карымского озера после подводного извержения 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4. С. 3-27.
3. Вегасова Л.П., Карпов Г.А., Лупикина Е.Г., Андреев В.И., Надежная Т.Б. Постэруптивная деятельность в кальдере Академии Наук (Камчатка): минеральные новообразования, содержание радона в спонтанных газах и биогические изменения // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 49-65.
4. Влодавец В.И. Вулканы Карымской группы // Тр. Камчатской вулканол. станции. 1947. Вып.3.С.3-46
5. Иванов Б.В. Современная гидротермальная деятельность в районе вулканов Карымской группы // Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма. Новосибирск: Наука, 1974. С. 32-38.

6. Карпов Г.А., Бортникова С.Б., Кузьмин Д.Ю. и др. Геохимия гидротерм кальдеры Академии Наук (Камчатка) // Гидрогеохимия и геохимия вод складчатых областей Сибири и Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 108-117.
7. Карпов Г.А., Лупкина Е.Г. Биохимические аспекты подводного извержения 1996 г. в кальдере вулкана Академии Наук на Камчатке // Тезисы докладов Первой международной научной конференции «Вулканизм и биосфера», г. Туапсе. 1998. С. 61-62.
8. Куренков С.И. Результаты интродукции кокани в Карымское озеро. Генетические и экологические проблемы разведения лососевых рыб // Тр. ГосНИОХР. Вып. 228. Л.: Промрыбвод, 1985. С. 98-104.
9. Лупкина Е.Г., Карпов Г.А. Альгосукцессия Карымского озера (итоги семилетних наблюдений влияний фреато-магматического извержения) / Сб. Вулканизм, биосфера и экологические проблемы. Материалы Третьей международной научной конференции, г. Туапсе. 2003. С.
10. Лупкина Е.Г., Никитина В.Н., Карпов Г.А. Некоторые сведения об альгофлоре Карымского озера / Сб. Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. / Материалы II научной конференции 9-10 апреля 2001 г., г. Петропавловск-Камчатский. С. 63-65.
11. Муравьев Я.Д., Федотов С.А., Будников В.А. и др. Вулканическая деятельность в Карымском центре в 1996 году: вершинное извержение Карымского вулкана и фреато-магматическое извержение в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 38-70.
12. Николаева А.Г., Карпов Г.А., Лупкина 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., г. Петропавловск-Камчатский. С. 37-47.
13. Пилипенко Г.Ф. Гидротермы Карымского вулканического центра на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1989. № 6. С. 85-101.
14. Фазлуллин С.М., Ушаков С.В., Шувалов Р.А. и др. Подводное извержение в кальдере Академии Наук (Камчатка) и его последствия: гидрологические, гидрохимические и гидробиологические исследования // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 19-32.
15. Федотов С.А. Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучение и механизм // Вулканология и сейсмология. 1997. №5. С. 3-37.