

УДК 550.42.47:551.214

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА И БИОЦЕНОЗОВ ПРЕСНЫХ И ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД БАССЕЙНА ОЗЕРА КАРЫМСКОЕ ПОСЛЕ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ПОДВОДНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ 1996 г. В КАЛЬДЕРЕ АКАДЕМИИ НАУК (КАМЧАТКА)

© 2008 г. Г. А. Карпов¹, Е. Г. Лупикина¹, А. Г. Николаева¹,
А. Ю. Бычков², С. А. Лапицкий², И. Ю. Николаева²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

²Геологический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, 119899

Поступила в редакцию 08.10.2007 г.

По результатам биогидрогеохимического мониторинга рассматривается динамика изменения гидрогеохимических характеристик водной массы озера Карымское, состояние и характеристика зон подводных разгрузок в кратере Токарева, образовавшемся в 1996 г., гидрогеохимическая характеристика термальных источников обрамления озера и сукцессии биоты в нем за период 1996–2006 (2007) гг. Обнаружены стратификация химического состава вод озера по глубине и наличие устойчивых зон повышенных содержаний растворенного кислорода. Выявлена тенденция ошелачивания вод озера и понижения их общей минерализации. Продолжается деятельность новообразованных термальных источников и подводных разгрузок терм и газов. Получены первые данные по содержанию микроэлементов в термальных источниках Карымского бассейна. Биоразнообразие водорослей в Карымском озере увеличилось, в основном, за счет видового разнообразия бентических *Bacillariophyta*. В апреле 2007 г. в озере зафиксирована регенерация планктонной фитокомпоненты докатастрофического периода.

ВВЕДЕНИЕ

Бассейн Карымского озера, вместе с вытекающей из него р. Карымской, впадающей в Кроноцкий залив Тихого океана, занимает центральное место в геоструктуре Карымского вулканического центра Восточной Камчатки и являет собой пример уникального целостного вулканогенного гидроландшафтного комплекса. Здесь наблюдается широкое проявление сейсмических, вулканических, гидротермальных и микробиологических процессов, связанных с деятельностью длительноживущих магматических очагов [4, 5].

Подводное извержение 01-02.01.1996 г. в заполненной пресноводным озером кальдере Академии Наук привело к крупным морфологическим изменениям в северном секторе кальдеры, к инверсии химического состава и температуры воды озера, а также вызвало глубокую депрессию в развитии его биоты [14, 20, 21]. Кроме того, с 1996 г. по настоящее время (2007 г.) бассейн озера испытывает своеобразное воздействие извергающегося вулкана Карымский, отложения пепловых выбросов которого участвуют в накоплении донных осадков и играют определенную роль в формировании химического состава водной массы озера.

В этой связи целью наших исследований было, главным образом, изучение биогидрохимических последствий подводного извержения и динамики

восстановления экосистемы бассейна Карымского озера в посткатастрофический период на фоне продолжающегося извержения Карымского вулкана.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Основным методом исследований был комплексный гидробиогидрохимический мониторинг бассейна Карымского озера, проводившийся сезонно с 1996 г. Особое внимание уделялось изучению гидрохимических характеристик водной массы озера, а также динамике изменения его солевого и газового состава и получению материала для предварительного прогноза времени восстановления деградированного бассейна.

С разной степенью детальности за 10 лет наблюдений обследована и опробована вся территория бассейна Карымского озера. Особенно детально, с помощью оборудованного лебедкой катамарана, с 2001 г. опробовались две станции: S_1 – в центре образовавшегося в 1996 г. кратера Токарева в северном секторе озера и S_2 – в центре акватории озера (рис. 1), на которых сезонно, два раза в год (в апреле, со льда; летом – в июле-августе, с катамарана), отбирались батометром через 10 м (а в поверхностном слое воды в интервалах 2, 5, 7 м) до дна (60 м) пробы воды на полный гидрохимический анализ, анализ биогенных компонентов и содержание

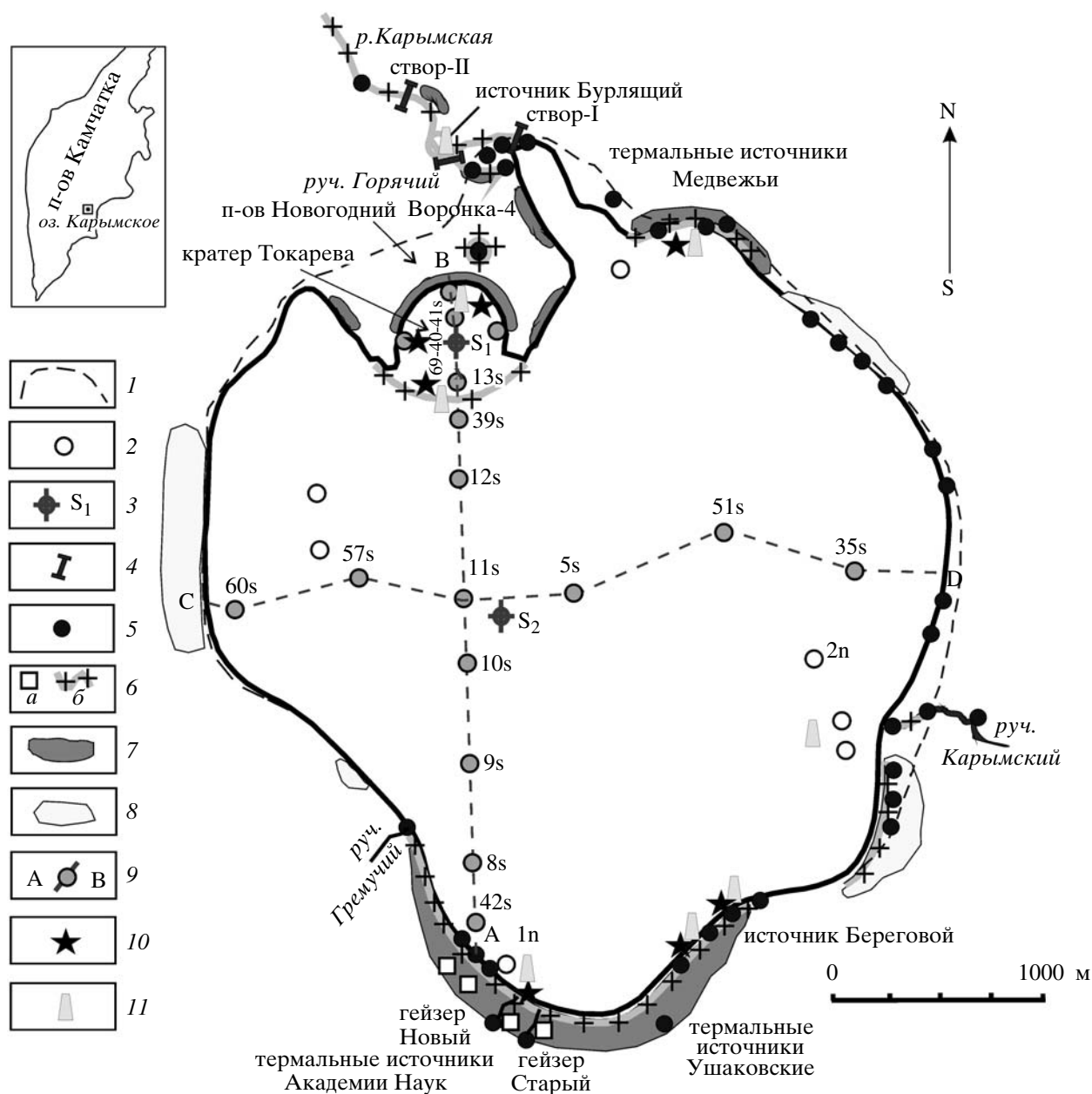


Рис. 1. Схематическая карта Карымского озера и мест отбора проб в 1997–2007 гг. 1 – береговая линия оз. Карымское до фреатического извержения в нем в 1996 г.; 2 – станции опробования на акватории озера; 3 – режимные станции комплексных опробований гидрохимических параметров; 4 – режимные створы на р. Карымская; 5 – точки изучения биоценозов в прибрежной зоне озера; 6 – места развития фито- (а) и зооценозов (б); 7 – площади разгрузок термальных вод по замерам 2000 г.; 8 – площади разгрузок грунтовых вод; 9 – гидрохимические профили со станциями комплексного опробования в 2000–2002 гг.; 10 – места донных выходов гидротерм; 11 – донные выходы газов. На врезке показана карта Камчатки с районом работ.

растворенного кислорода, выборочно – на геохимический анализ. Параллельно измерялись температуры опробованных горизонтов. В период 1996–1999 гг. на этих и других станциях режимные пробы отбирались только с поверхности. Кроме того, опробование с целью исследования биоценозов и содержания в воде биогенных компонентов прово-

дилось регулярно в прибрежной зоне озера и эпизодически аквалангистами в разных секторах озера до глубин 20 м. Драгированием поднимались донные пробы с глубин 20–60 м.

Летом 2001 г. с помощью катамарана было выполнено гидрохимическое профилирование на 10 станциях по направлению Ю-С, от береговой зоны

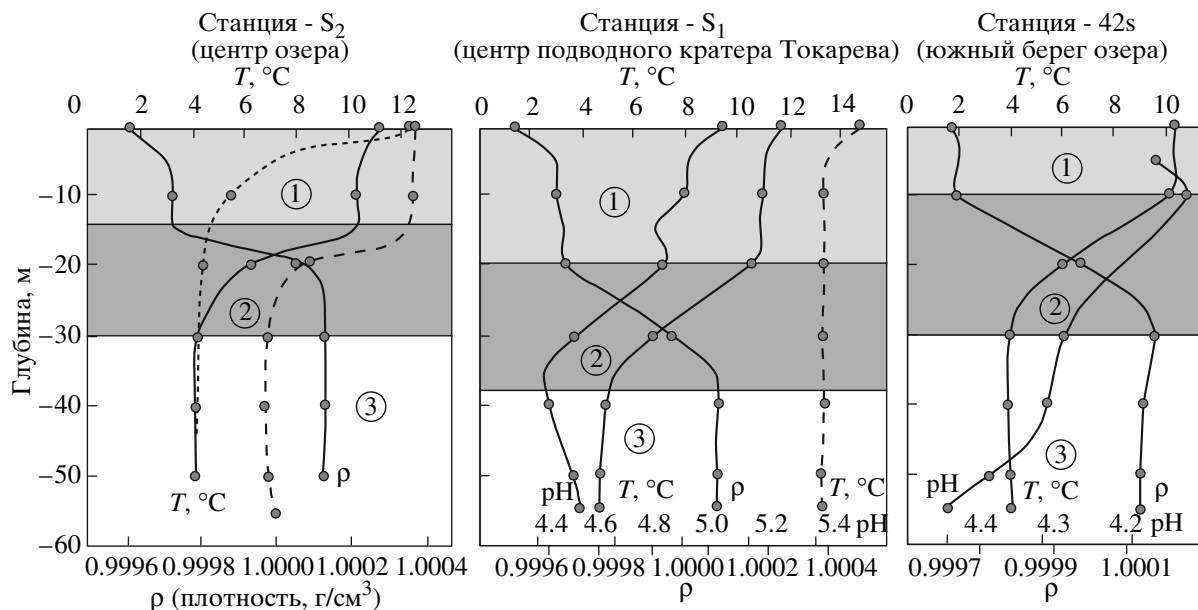


Рис. 2. Вариации T , °C, pH и плотности (ρ) воды в вертикальных профилях (точки отбора проб воды через 10 м) на оз. Карымское по данным наблюдений в 1996 и 1998 гг. Цифрами в кружках обозначены: 1 – эпилимнион; 2 – металимнион; 3 – гипolimнион; кривыми линиями: сплошной – измерения 14.08.98, пунктирной – измерения 14.09.96, точечной – измерения 30.08.1996 г.

разгружающихся в озеро источников Академии Наук, через кратер Токарева к участку разгрузки гидротерм в пляжной зоне кратера (рис. 1, профиль АВ). Визуально и инструментально (с помощью спутникового GPS-навигатора) фиксировались участки термальной разгрузки по периметру озера, обследовались все крупные термопроявления с изменениями температуры и отбором воды, газов и осадков.

Площадное и глубинное гидрохимическое опробования вод Карымского озера осуществлялось с применением опрокидывающихся батометров фирмы “HYDRO-BIOS KIEL” шведского производства с глубоководными термометрами ТГ. Температурная съемка глубинных зон озера в зимнее время, со льда, выполнялась с использованием “косы” с термисторами GTH-1160 фирмы “Greisinger” (с Ni/Cr термопарой), размещенными на расстоянии 10 м друг от друга.

Определение растворенного кислорода в 1998–2006 гг. проводилось по общепринятой в гидрохимической практике методике [17]. На определение содержания растворенного кислорода пробы воды отбирались на гидрохимических станциях в вертикальном профиле озера через 5–10 м в герметичные склянки с притертыми пробками. Донные выходы газогидротерм, обнаруженные во время исследований в 1999–2005 гг., обследовались визуально, фотографировались и опробовались (с отбором проб воды, газов, осадков и биоты) с помощью аквалангистов. Полный гидрохимический анализ проб производился в Аналитическом центре Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Определение содержания микроэлементов в водах и осадках выполнены методом ICP в аттестованной лаборатории геологического факультета Московского государственного университета на приборах ICP – MS “Element-2”, Германия, ICP – MS “Plasma Quad-2” VG, Англия и ICP – OES “ICAP-61, Thermo Jarrell”, США.

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНОЙ МАССЫ ОЗ. КАРЫМСКОЕ ЗА ПЕРИОД 1996–2006 ГГ.

Исследования показали, что после подводного извержения 1996 г. вода в озере была перемешана и имела приблизительно однородные характеристики в отношении температуры, pH и химического состава по всей толще как в кратере, так и на акватории [20, 21, 23]. Но уже в 1998 г. была отмечена довольно четкая стратификация водной массы озера по этим параметрам. При этом обнаружено типичное для глубоководных пресноводных водоемов вертикальное распределение температур.

Слой температурного скачка (термоклин) в акватории озера начинается с глубины около 10–20 м. Ниже, с увеличением глубины, температура плавно снижается. Ниже 30–40 м выделяется зона гипolimниона, в пределах которой температура в течение года держится в пределах 4°C (рис. 2). Такая картина характерна для всей акватории озера. Но на некоторых участках фиксируется слабое повышение температуры в придонном слое [15]. В кратере Токаре-

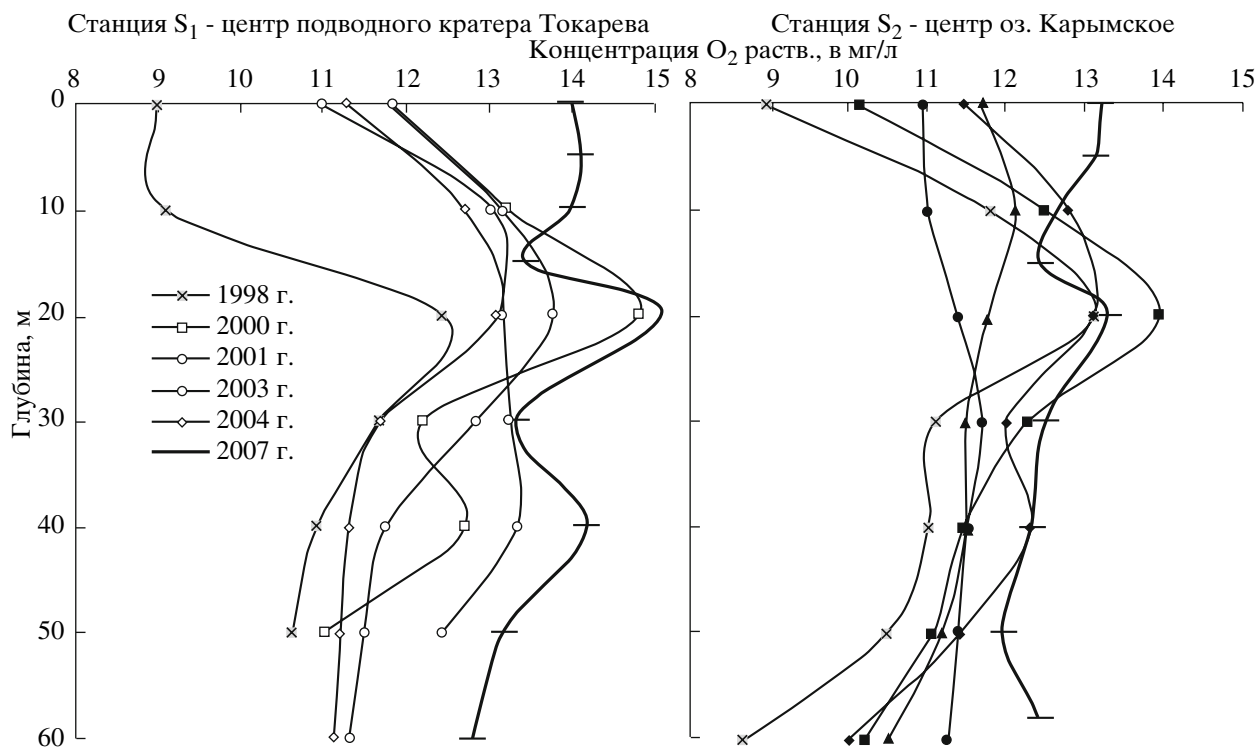


Рис. 3. Концентрация растворенного кислорода (O_2 раств.) в вертикальном профиле оз. Карымского (по данным наблюдений в период 1998–2007 гг. на режимных станциях: S_1 – центр подводного кратера Токарева и S_2 – центр озера).

ва (рис. 1, станция S_1) распределение температуры по глубине совершенно иное. Здесь, также как и в прибрежном южном секторе озера (рис. 1, точка 42s), где разгружаются термальные воды источников Академии Наук, в летний период на поверхности держится температура воды в пределах 12–14°C. К глубине 40 м она плавно понижается до 4.6°C и сохраняется на этом уровне до дна (56 м). Хорошее согласование с распределением температуры воды имеют величины pH и плотности воды (рис. 2).

Устойчивое повышенное содержание растворенного кислорода (до 14.0 мг/л) наблюдается в слое воды в интервале глубин 10–25 м для акватории озера и с 0 до 40 м в кратере Токарева, где содержание O_2 в летний сезон достигает 14.7 мг/л (рис. 3). Распределение температуры, pH и содержания растворенного кислорода в толще воды озера представлено на рис. 4.

По данным многолетних режимных наблюдений отмечается определенная стратификация химического состава воды Карымского озера (табл. 1, рис. 5). Придонная вода в кратере Токарева и в основном бассейне имеет более высокую общую минерализацию. При этом и в акватории озера, и в кратере Токарева с глубины 10–20 м наиболее резко увеличиваются концентрации основных макрокомпонентов: Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} . Для Mg^{2+} картина распределения концентрации по глубинам не-

сколько более сложная, с максимумом на глубинах 10–30 (40) м и разнонаправленным трендом (по различным годам наблюдений) в придонной части озера (рис. 5). Тем не менее следует отметить тенденцию обогащения ионами кальция и магния именно придонного слоя воды, что, возможно, связано с выщелачиванием их из пепловых и подстилающих осадков. Концентрация щелочных элементов Na^+ и K^+ имеет другую закономерность распределения. Максимально высокое содержание ионов натрия (до 70–72 мг/л в 2000 г. и более 80 мг/л в 1996 г.) приурочены к линзе в центре озера в интервалах глубин 20–40 м. С 2000 г. некоторое увеличение содержания натрия отмечается с глубины 30 м и в придонной зоне как в кратере, так и в акватории (рис. 5). В кратере Токарева, на дне содержание иона натрия в воде на 5–12 мг/л выше, чем на поверхности. Незначительное увеличение содержания иона натрия наблюдается вблизи северного и южного секторов озера, где разгружаются воды термальных источников (на севере – из пляжной зоны кратера). Для калий-иона наблюдается та же картина – в зоне смешения с термальными водами его содержание повышается до 8.0–8.6 мг/л, а в акватории практически по всей глубине составляет 6.0–7.7 мг/л.

Обнаружено anomальное распределение бора в воде озера. Из табл. 1 и на рис. 6 видно, что в кратере-

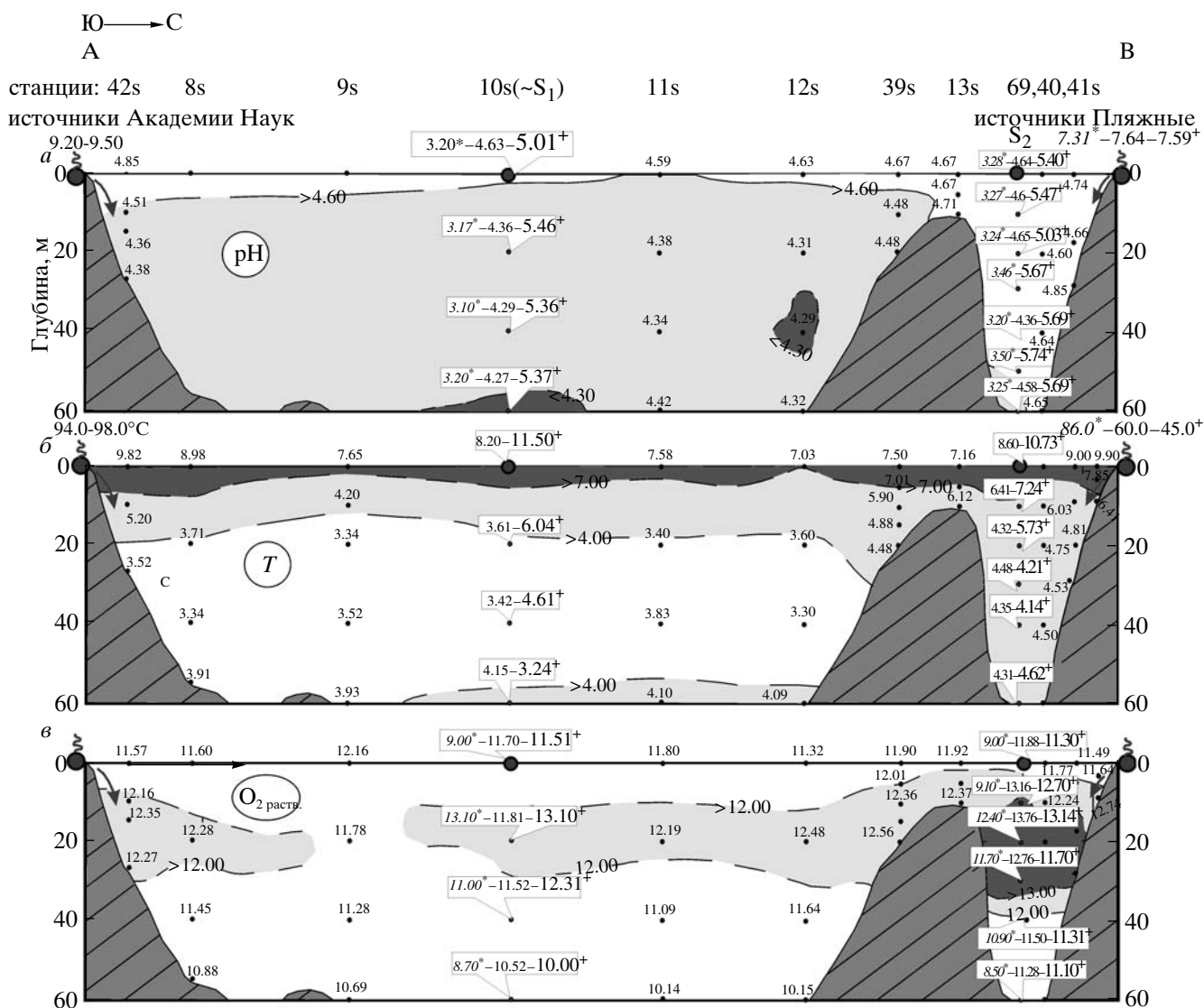


Рис. 4. Распределение в вертикальном профиле А-В озерной воды по данным наблюдений 1996–2004 гг.: рН (а), T , °С (б), O_2 раств., мг/л (в). На профиле цветом обозначены значения параметров: белым – рН < 4,30, T < 4,0°С, O_2 раств. < 12,0 мг/л; серым – рН в диапазоне 4,30–4,60, T – 4,0–7,0°С и O_2 раств. – 12,0–13,0 мг/л; темным – рН > 4,60, T > 7,0°С, O_2 раств. > 13,0 мг/л. Штрихом на темном фоне показана морфология бортов оз. Карымское и кратера Токарева, точками – места отбора водных проб (через 10 м), цифрами – концентрация: со звездочкой сверху – весной 1996 г.; без звездочки – летом 2001 г.; с плюсом – летом 2004 г.

ре Токарева концентрация H_3BO_3 выше, чем в акватории озера. В глубинных пробах 2000 г. содержание H_3BO_3 в 3 раза превышает его уровень в поверхностной воде. В 2001–2003 гг. вертикальное распределение содержания H_3BO_3 относительно выравнивается. Однако с 2004 г. в кратере Токарева в придонной зоне фиксировалось повышенное содержание бора. По результатам определения содержания бора в воде р. Карымская до створа I и ниже его, где примешивается термальна́я вода руч. Горячий, также отмечаются его повышенные концен-

трации. По-видимому, переменным по мощности источником поступления бора в воду озера являются гидротермы, разгружающиеся на дне озера.

В течение 10 лет после подводного извержения общая минерализация воды озера по данным наблюдений на станциях S_1 и S_2 уменьшилась вдвое (табл. 1; рис. 5, 7). Особенно заметно понизилась концентрация Ca^{2+} и SO_4^- , (рис. 5). Наблюдается также закономерное увеличение рН озерной воды (рис. 7). После извержения в 1996 г. вода в озере

Таблица 1. Данные наблюдений за основным солевым составом (мг/л) в оз. Карымском в летнее время 2000–2006 гг.

Режимная станция – S ₂ (центр оз. Карымского)											Режимная станция – S ₁ (центр подводного кратера Токарева)							
Na ⁺																		
H, м	1984	1993	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
0	10.4	14.0	79.0	66.7	48.6	58.1	49.5	47.0	45.6	–	72.0	66.1	59.8	51.6	52.8	55.7	45.1	55.5
10	–	–	71.0	65.6	50.0	57.8	49.5	48.0	47.3	49.6	60.0	68.1	63.82	52.5	52.8	56.3	47.3	57.31
20	–	–	82.0	68.4	60.12	60.15	58.0	48.9	48.6	44.5	61.0	68.5	67.85	52.5	56.8	56.9	50.3	56.79
30	–	–	74.0	69.3	60.8	61.8	58.4	48.9	51.2	44.5	60.0	74.6	67.0	54.0	60.4	62.3	55.9	58.37
40	–	–	70.0	70.9	61.28	61.5	57.8	49.1	54.2	45.2	58.0	72.0	67.6	57.8	60.0	63.6	57.2	61.82
50	–	–	82.0	75.0	61.2	61.5	58.0	51.0	54.2	45.2	60.0	72.4	67.0	58.1	60.5	64.2	56.8	–
60	–	–	79.4	71.8	60.98	62.7	58.3	56.2	55.1	–	51.0	71.0	65.38	60.0	62.1	64.8	56.4	62.3
K ⁺																		
H, м	1984	1993	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
0	1.6	0.84	20.0	8.0	6.0	6.5	6.4	6.5	5.6	–	10.5	7.1	4.6	8.8	6.4	6.5	5.4	5.9
10	–	–	17.5	7.6	6.5	6.5	6.4	6.5	5.5	4.9	10.2	7.8	5.1	7.6	6.4	6.5	5.4	4.9
20	–	–	19.8	8.5	7.6	6.8	7.0	6.6	5.7	4.6	17.0	7.3	5.4	7.9	6.9	6.5	6.3	5.1
30	–	–	15.0	8.6	7.5	7.0	7.1	6.6	6.1	4.6	10.2	7.8	6.0	8.0	7.7	6.5	6.4	5.1
40	–	–	16.8	8.6	7.6	7.2	7.1	6.7	6.3	4.6	10.3	7.8	6.8	8.5	7.5	6.8	6.6	5.5
50	–	–	15.0	9.1	7.7	7.2	7.2	6.9	6.6	4.6	10.0	7.9	7.3	–	7.7	7.1	7.0	–
60	–	–	18	9.0	7.7	7.5	7.3	7.1	6.5	–	9.8	7.7	8.0	8.8	7.8	7.1	6.7	5.1
Ca ²⁺																		
H, м	1984	1993	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
0	1.6	6.0	64.0	35.3	28.1	29.7	28.1	25.6	22.4	–	66.0	36.0	30.5	30.5	28.9	26.4	21.6	21.6
10	–	–	64.2	38.0	30.0	28.9	28.1	26.4	23.2	20.4	66.2	36.4	33.7	30.5	28.9	28.1	23.2	21.6
20	–	–	65.0	38.0	37.7	31.3	32.0	26.4	24.0	24.1	67.0	40.4	36.9	30.5	31.0	28.1	24.8	21.6
30	–	–	64.1	40.0	38.0	33.7	32.1	26.4	24.8	24.1	64.6	40.1	37.0	32.9	32.1	29.7	27.2	22.9
40	–	–	64.0	42.0	37.7	33.7	32.3	26.4	25.6	23.2	65.0	39.2	37.5	34.5	32.5	29.7	28.1	24.1
50	–	–	64.1	42.0	37.6	34.5	32.7	27.2	25.6	–	65.0	39.7	37.9	34.5	32.1	29.7	28.1	–
60	–	–	65.0	42.0	37.7	35.3	32.9	27.22	5.62	0.8	67.0	40.1	38.5	35.3	33.0	29.7	28.1	23.3
Mg ²⁺																		
H, м	1984	1993	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
0	0.5	1.6	15.1	8.5	7.3	8.8	7.8	6.8	5.8	–	14.8	10.2	8.8	8.3	7.3	7.3	6.3	4.9
10	–	–	15.0	13.3	8.0	9.7	7.8	6.3	6.3	6.1	14.9	7.7	8.8	8.3	7.3	6.8	6.3	5.4
20	–	–	15.1	13.3	9.7	9.7	8.4	6.3	6.8	5.4	15.0	7.7	9.7	7.3	7.8	9.7	8.3	5.4
30	–	–	15.0	13.3	9.5	9.7	8.3	6.3	7.3	5.4	14.5	10.2	9.9	8.3	8.3	8.8	7.3	5.4
40	–	–	15.1	12.1	9.7	9.7	8.3	6.3	7.3	5.4	14.7	9.7	10.2	9.2	8.8	8.8	7.3	4.9
50	–	–	15.5	12.1	12.0	9.2	8.3	6.3	7.8	6.8	14.8	10.0	11.3	9.7	9.2	8.8	6.8	–
60	–	–	17.0	12.1	22.9	9.2	8.3	6.3	7.8	–	15.2	10.2	12.2	10.2	9.0	8.3	6.8	5.8
Cl [–]																		
H, м	1984	1993	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
0	8.5	21.3	45.0	43.1	37.6	41.8	41.1	42.2	35.2	–	40.0	44.6	40.4	44.7	41.8	39.7	35.3	39.0
10	–	–	44.7	45.1	–	41.8	41.1	42.2	38.3	39.1	39.14	3.9	43.3	42.6	41.8	41.1	37.6	40.4
20	–	–	52.0	47.2	46.1	44.0	44.0	42.2	37.6	35.5	39.9	48.2	45.4	43.3	45.0	41.8	40.4	41.1
30	–	–	41.8	49.4	–	45.4	45.4	42.5	41.4	35.5	39.3	46.1	44.1	46.1	48.2	44.7	45.4	44.0
40	–	–	52.1	47.2	–	45.4	46.0	42.5	41.8	35.5	39.4	48.2	46.2	49.7	48.7	46.1	45.4	44.0
50	–	–	40.2	51.8	46.8	45.4	47.1	44.0	43.3	35.5	35.5	48.9	48.6	–	49.3	46.1	44.7	–
60	–	–	50.0	49.4	46.8	47.7	48.2	47.2	43.3	–	35.7	51.1	49.6	49.7	50.0	47.5	44.7	44.7

Таблица 1. Окончание

Режимная станция – S ₂ (центр оз. Карымского)											Режимная станция – S ₁ (центр подводного кратера Токарева)							
SO ₄ ⁻																		
H, м	1984	1993	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
0	3.8	4.8	351.0	201.7	153.7	172.9	148.9	153.7	134.5	–	378.0	201.7	172.9	182.5	–	163.3	134.5	115.3
10	–	–	400.0	211.3	137.0	163.3	148.9	153.7	134.5	129.6	359.0	201.7	192.1	172.9	158.5	163.3	134.5	123.0
20	–	–	358.0	220.9	182.5	182.5	175.0	153.7	144.1	127.7	343.0	211.3	211.3	182.5	163.2	168.1	144.1	123.0
30	–	–	350.0	230.5	202.0	201.7	177.7	153.7	158.5	127.7	340.0	230.5	215.0	192.1	187.3	168.1	163.3	123.0
40	–	–	517.0	240.1	211.3	211.3	172.0	153.7	163.3	127.7	400.0	230.5	220.1	192.1	185.0	168.1	163.3	130.6
50	–	–	390.0	240.1	214.0	211.3	176.0	158.5	163.3	128.6	350.0	220.0	225.4	197.5	187.3	168.1	163.3	–
60	–	–	391.0	240.1	220.9	211.3	187.3	163.3	163.3	–	351.0	211.3	230.5	201.7	190.0	168.1	163.3	153.7
HCO ₃ ⁻																		
H, м	1984	1993	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
0	35.1	22.0	0.0	0.0	1.2	2.4	0.6	0.0	2.6	–	0.0	4.3	3.0	2.4	1.2	1.0	3.8	1.2
10	–	–	0.0	0.0	1.1	2.4	0.6	0.0	2.6	2.4	0.0	2.4	2.4	2.4	1.2	1.0	2.6	4.9
20	–	–	0.0	0.0	1.0	2.4	0.6	0.2	2.6	6.1	0.0	2.4	1.8	2.4	1.0	1.2	3.8	–
30	–	–	0.0	0.0	0.6	2.4	0.6	0.0	2.6	6.1	0.0	2.4	1.6	2.4	0.6	2.4	3.8	–
40	–	–	0.0	0.0	0.6	2.4	0.6	0.2	3.8	3.7	0.0	3.7	1.5	2.4	0.7	2.4	3.8	–
50	–	–	0.0	0.0	0.6	2.4	0.6	0.2	3.8	–	0.0	2.6	1.0	2.4	0.6	2.4	3.8	–
60	–	–	0.0	0.0	0.6	2.4	0.6	0.2	3.8	–	0.0	2.4	0.6	2.4	0.6	1.2	3.8	–
Минерализация, в мг/л																		
H, м	1984	1993	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	1996	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
0	109.6	140.0	985.0	501.0	424.0	463.3	519.0	481.3	370.1	–	692.0	517.1	319.3	465.3	470.0	520.7	370.3	454.2
10	–	–	–	510.0	471.0	443.5	520.0	481.5	379.5	363.6	–	520.0	349.2	460.9	471.8	527.7	371.3	425.5
20	–	–	–	560.0	512.0	473.1	524.5	482.3	392.1	369.4	–	547.8	378.4	455.5	578.0	548.5	397.8	587.3
30	–	–	–	564.0	539.0	500.8	535.0	503.9	423.4	360.1	–	575.0	–	499.9	603.2	553.9	439.8	603.2
40	–	–	–	556.0	529.0	512.3	530.0	495.5	446.8	353.7	–	565.1	–	486.4	603.8	561.0	445.8	622.9
50	–	–	–	570.0	547.0	515.6	1.059	486.1	448.1	342.8	–	542.3	–	492.8	604.7	561.8	464.0	–
60	–	–	–	578.0	592.0	513.0	594	528.3	477.2	–	–	529.2	630.8	511.6	607.0	580.2	451.4	467.4

Примечание. Анализы выполнены в гидрохимической группе ЦХЛ ИВиС ДВО РАН. Аналитик С.В. Сергеева. H, м – глубина водного слоя; – нет данных; данные за 1984 г. взяты из [2], за 1993 и 1996 гг. из [18], за 2002 и 2004 гг. предоставлены С.В. Ушаковым.

имела рН = 3.2. В августе 2004 г. водородный показатель достиг значения 5.5, в 2005 г. – 6.0, в 2007 г. – 6.5–6.8 (рис. 7). На фоне постепенного снижения общей минерализации и опреснения воды озера с 1996 по 2001 гг. отмечается ее небольшое увеличение в 2002–2003 гг. и стабилизация в 2004 г. (рис. 7), что, по нашему мнению, связано с изменением активности вулкана Карымский [16].

По общепринятой гидрохимической классификации вода Карымского озера в настоящее время (2008 г.) относится к сульфатному классу (с заметной примесью хлора). Сульфатно-хлоридный, натриево-кальциевый тип воды озера не изменился за 10 лет наблюдений при постепенном его опреснении¹.

¹ Название гидрохимических типов вод дается по их основным анионам и катионам в порядке уменьшения их концентраций.

СОСТОЯНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОН ПОДВОДНЫХ РАЗГРУЗОК ГИДРОТЕРМ В КРАТЕРЕ ТОКАРЕВА

После окончания подводного извержения в Карымском озере, в северной части образовавшегося кратера Токарева, появились высачивания гидротерм [3, 19]. Особенно отчетливо они прослеживались в пляжной зоне (рис. 1), где в кольцевом секторе, протяженностью около 250 м в береговых закопушках глубиной до 20 см, появлялась вода с рН 7.0–7.3 и температурой до 79°C.

Вода в прилегающей к этому сектору мелководной части озера прогревалась до 50°C. Здесь, на дне озера до глубины 2–2.5 м, уже в 1997 г. формировались тонкие пленки альгобактериальных сообществ буровато-зеленого цвета. По данным Института микробиологии РАН они относились к осцилляториевым (*Cyanoprocarvota*). В период 1996–1998 гг. вода озера имела рН порядка

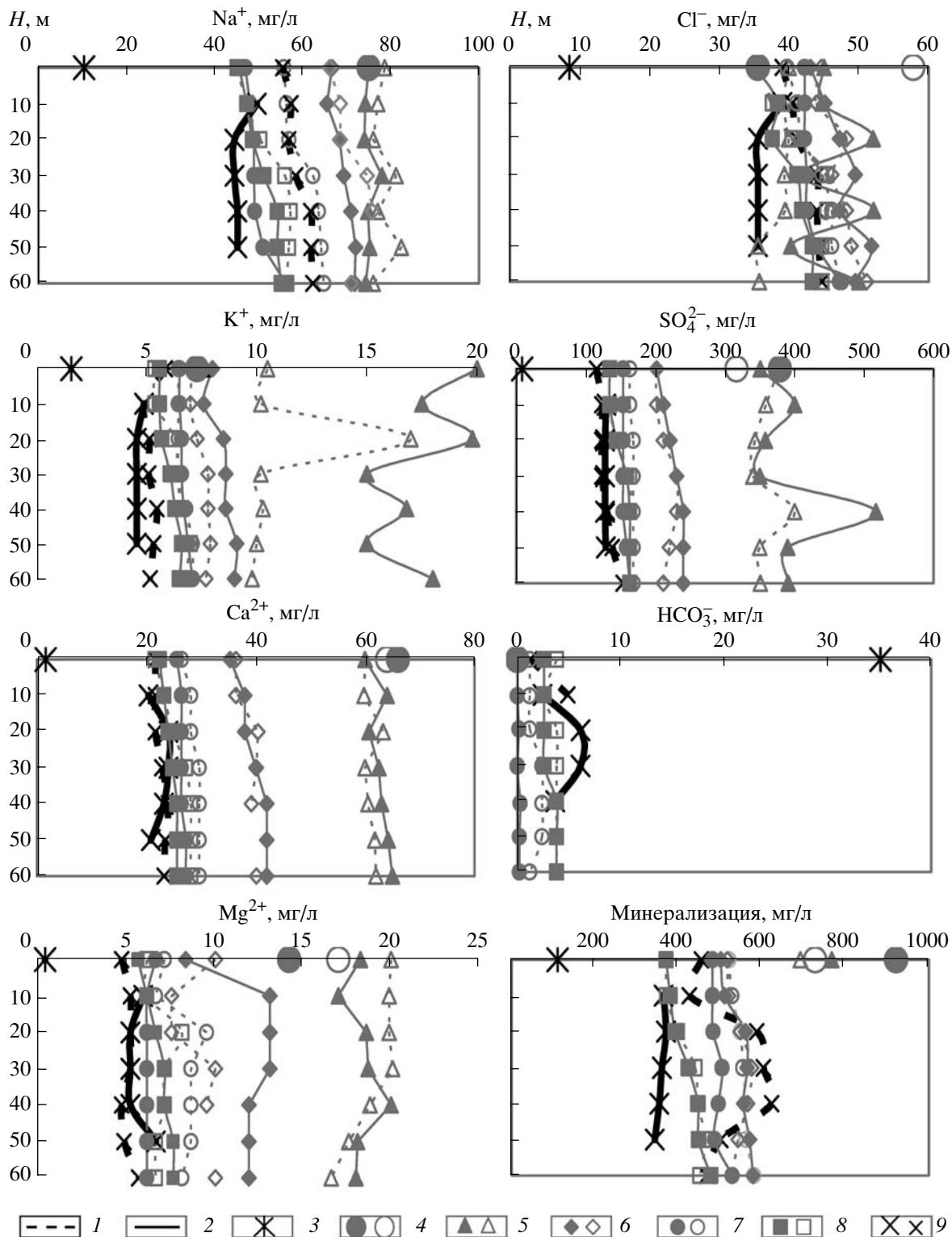


Рис. 5. Концентрации компонентов химического состава воды оз. Карымское по данным режимных наблюдений на станциях S₁ и S₂ в 1984–2006 гг.: 1 – ст. S₁-центр подводного кратера Токарева; 2 – ст. S₂ – центр озера Карымское; 3 – данные 1984 г.; 4 – (зима) 1996 г.; 5 – (весна) 1996 г.; 6 – 2000 г.; 7 – 2004 г.; 8 – 2005 г.; 9 – 2006 г. (жирная линия).

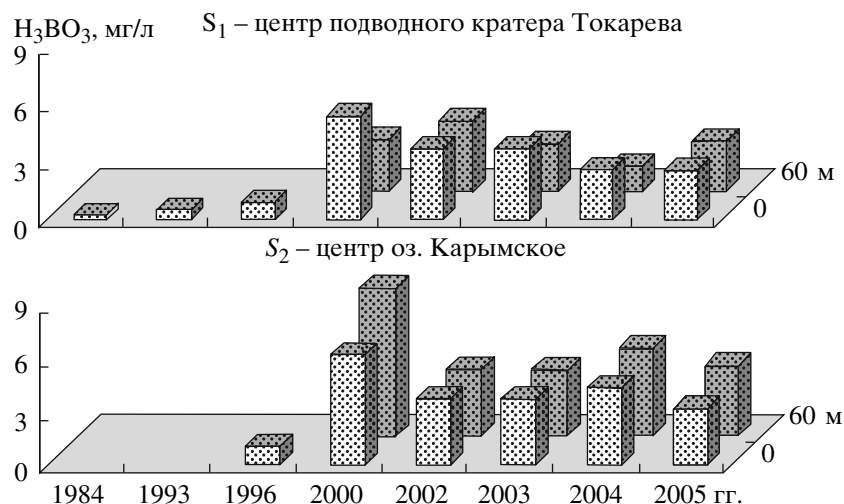


Рис. 6. Вариации содержаний H_3BO_3 в воде оз. Карымское в поверхностном (0 м) и придонном (60 м) слоях по данным наблюдений 1984–2005 гг. на станциях S_1 и S_2 .

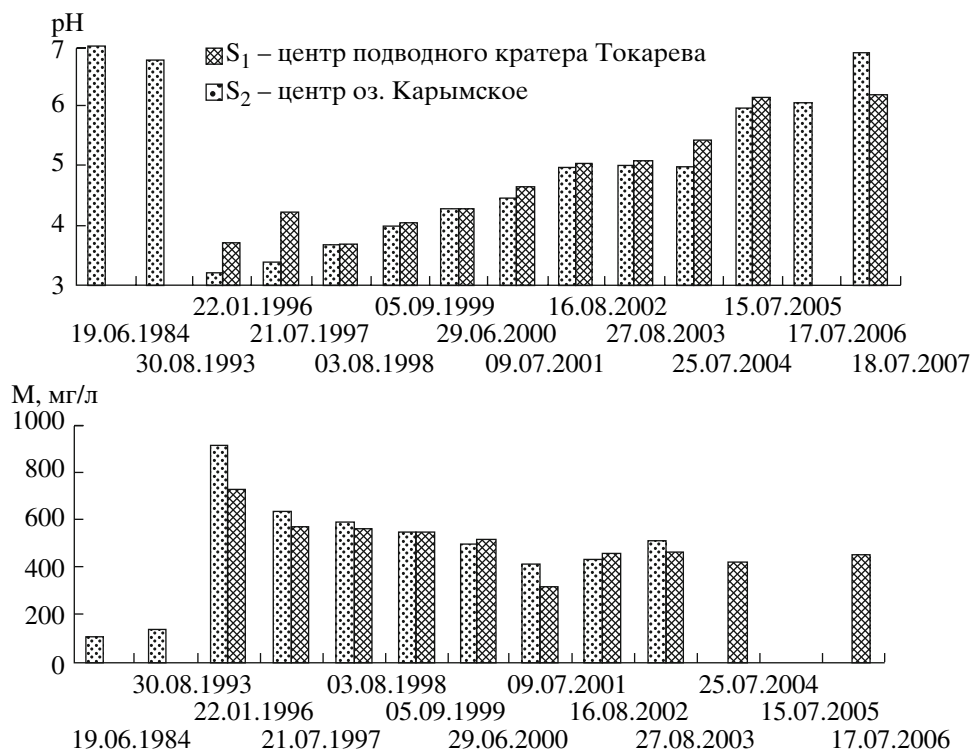


Рис. 7. Динамика изменения pH и общей минерализации (M, мг/л) в поверхностном слое воды оз. Карымское по данным наблюдений 1984–2007 гг. на станциях S_1 и S_2 .

3.2–3.5. В это время в озеро попадало большое количество андезитового пепла от извергающегося вулкана Карымский, и в зоне смешения кислой озерной воды и воды близнеитральных гидротерм, на гидрохимическом барьере, образовывался осадок, обогащенный гидроокислами железа бурого цвета. К 2002 г. pH озерной воды увеличился до значения 5.2. В течение 1996–2002 гг. уровень озера понижался и

в 2003 г. стабилизировался на отметке 624.0 м, соответствующей его положению до извержения 1996 г. Соответственно, мигрировали участки прибрежной разгрузки гидротерм, и изменялся видовой состав альгобактериальных сообществ, о чем будет сказано ниже.

В 1999 г. при водолазном обследовании дна кратера Токарева в северном, западном и южном его

секторах, на глубинах 6–10 м, были обнаружены участки донных выходов гидротерм с температурой 32–64°C и с величинами рН 6.2–6.6. Выходы гидротерм фиксировались в пределах узких корытообразных впадин, ориентированных в субмеридиональном направлении в согласии с ориентировкой поверхностных разрывных нарушений в борту р. Карымская, связанных с землетрясением, предвавшим извержение 1996 г. [12]. На этих участках сформировались слоистые маты колоний цианобактерий из рода *Phormidium* зеленого цвета, мощностью 2–3 мм. Там, где наблюдалось скопление газов, маты приобретали облик холмиков и караваев. При протыкании этих образований выделялся свободный газ, в составе которого преобладал азот (до 97% об. N₂).

В 2001 г. эти выходы исчезли, а маты подверглись деструкции. В 2002 и 2003 гг. подводные разгрузки обнаружены не были. В конце июля 2004 г. при водолажном обследовании были отмечены 4 участка донных выходов гидротерм. Они были расположены во внутренней кольцевой зоне кратера Токарева, но на несколько меньших глубинах (4–7 м), практически в границах 2000 г. В отличие от выходов, обнаруженных в 1999–2000 гг., они представляли собой мелкие воронки, из которых поступала вода с температурой 30–45°C, рН = 6.6–6.8 с очень слабым газовыделением. Дно в этих местах было покрыто вязким черным илом с пятнами оранжевого цвета (окислы железа). Вокруг воронок развивались тончайшие пленки альгобактериальных образований белесого и бледно-зеленого цвета.

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОБРАМЛЕНИЯ ОЗ. КАРЫМСКОЕ

Общеизвестны многочисленные публикации об изменении химического состава, температуры, дебита, газового режима термальных источников в связи с землетрясениями [10, 22]. Меньшее число публикаций посвящено реакции термальных источников на извержения вулканов [6, 24]. Последствия подводного извержения в кальдере Академии Наук в 1996 г. являются убедительным свидетельством парагенетической связи процессов вулканизма и гидротермальной деятельности. Как известно, в кальдере после землетрясения и последующего за ним извержения появились новые термальные источники, а существовавшие ранее заметно среагировали на вулканотектонические события (например, произошла перегруппировка выходов гидротерм в группе источников Академии Наук, возник новый гейзер и т.д.) [2, 7, 9, 15, 20].

Наши исследования позволили проследить эволюцию гидрогеохимических характеристик гидротерм кальдеры Академии Наук в течение длительного времени, включающего период покоя, предва-

ряющего подводное извержение, и значительный интервал времени после его завершения (табл. 2). По солевому составу гейзера Старый в группе источников Академии Наук имеются данные с 1947 г. [4]. Как видно из табл. 2 и на рис. 8, содержание основных компонентов химического состава воды гейзера Старый, по которому есть наиболее представительный ряд наблюдений, испытывает значительные колебания. Просматривается определенная закономерность, а именно – после извержения (в 1966 г. – вулкана Карымского, в 1996 г. – одновременных извержений вулкана Карымский и подводного извержения в самой кальдере Академии Наук) содержание Cl⁻, SO₄⁻, и синхронно с ними (Na + K) и H₃BO₃, сначала повышается, затем 3–4 года остается на приблизительно одном уровне, приближаясь к средне-максимальным значениям, а затем постепенно понижается. Такая же тенденция наблюдается после извержения 1996 г. и у новообразованного гейзера Новый (табл. 2). Снижение общей минерализации гидротерм к моменту активизации вулкана можно объяснить возникновением новых трещин, т.е. новых путей циркуляции метеорных вод, увеличивающих разбавление гидротерм.

В результате извержения 1996 г. на новообразованном полуострове Новогодний образовались новые группы источников, химический состав которых быстро эволюционировал (табл. 2). Наблюдения на источнике № 1 на руч. Горячий (Пийповские источники) показывают постепенное снижение концентрации основных минеральных компонентов. Вода этого источника относится к хлоридно-сульфатному, натриевому типу терм. Источник Провальный, возникший на глубине более 4 м в глубоком провале на п-ве Новогодний в 1997 г., имел воду типичного хлоридного, натриевого типа (табл. 2). Через год он был завален обрушившимися стенками провала и перестал функционировать. Отобранный на месте его существования в 2003 г. конденсат имел уже сульфатно-хлоридный, кальциево-натриевый состав (табл. 2), отражая процесс вторичного выщелачивания обогащенных сульфатом кальция [3] вмещающих пород.

Вода в озерке маара (воронка № 4), образовавшегося при извержении 1996 г. на п-ве Новогодний, после извержения имела температуру 64°C (на глубине 10 см, (в бортах маара до 75°C) и сульфатно-хлоридный, натриевый состав [3]. Но уже в сентябре 1996 г. температура в озерке упала до 21°C, произошло увеличение общей минерализации главным образом за счет сульфатной компоненты. В последующие годы наблюдений минерализация воды озерка плавно снижалась, отражая, по-видимому, уменьшение темпов выщелачивания (по мере исчерпания легко подвижных компонентов: SO₄, Cl, Ca, Na, K) из вмещающих пород. В сентябре 2007 г. температура в озерке маара понизи-

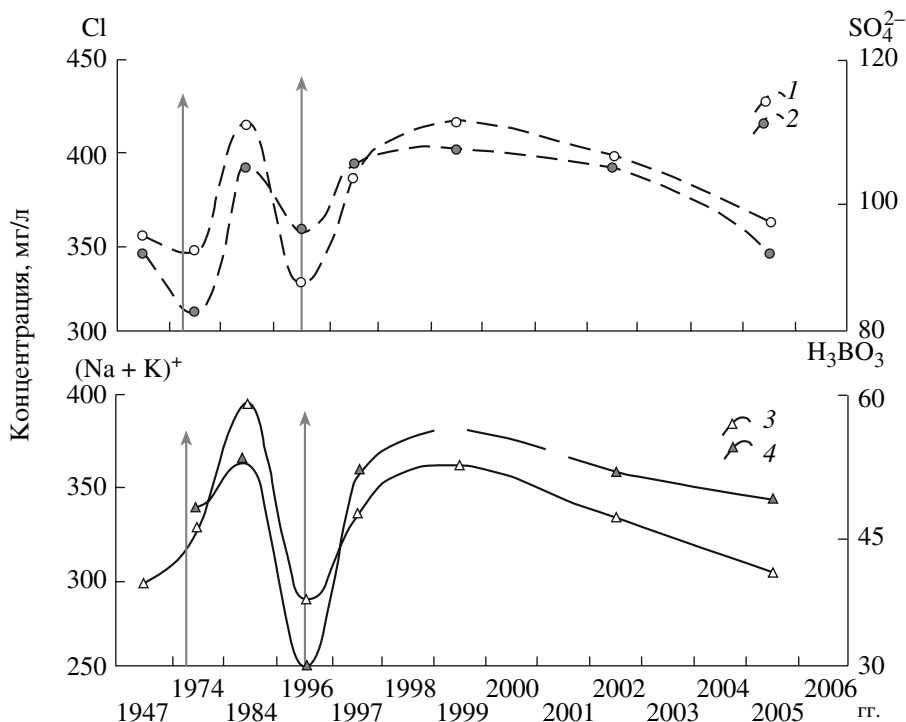


Рис. 8. Экстраполяция изменения концентраций основных компонентов химического состава воды гейзера Старый (1 – Cl, 2 – SO_4^{2-} ; 3 – $(\text{Na} + \text{K})^+$, 4 – H_3BO_3) за период наблюдений 1947–2006 гг. Стрелками показано время извержений вулкана Карымский в 1966 и 1996 г.

лась до 9°C , а температура боковых пород снизилась до $9\text{--}18^\circ\text{C}$ на глубине 10 см.

Вызывает интерес геохимия микроэлементов в термальных водах рассмотренных источников и гейзеров (табл. 3). Так, в воде гейзера Старый наблюдаются устойчивые повышенные содержания таких плохо сорбируемых элементов как V, As, Br, Mo, W, заметны содержания Br, Zr, Ge, Mn, Zn, Pb, Sb, Y, La, присутствуют Cd, Re, Tl, следы U.

В воде источника Карбонатный отмечены довольно высокие содержания P, заметные количества Pd, Pt, следы Ag, Au. В ней также наблюдаются повышенные концентрации As, Br, Pb, Sb, W и Tl. В водах донных разгрузок в кратере Токарева и в источнике № 1 фиксируются P, Pb и Mo. Кроме этого, в них присутствует редкий элемент Re, а в источнике № 1, также как и в Карбонатном, отмечены заметные содержания Pt и Pd. В термальной воде донной разгрузки в кратере Токарева наблюдаются высокие содержания P, Mn, Fe, заметные количества Zn, Cu, As, Ba, присутствуют Y, Mo, Sb, La, W.

С позиций выяснения генезиса разных гидрохимических типов термальных вод, разгружающихся в кальдере Академии Наук, показательна диаграмма смешения вод бассейна Карымского озера по отношениям содержания в них суммы ионов $(\text{Na} + \text{K})^+$ к Cl (рис. 9). Наблюдается прямая корреляция всех рас-

смотренных выше типов вод района по этим компонентам. Можно определенно говорить о том, что разнообразие типов гидротерм бассейна оз. Карымское определяется смешением атмосферных осадков (а также продуктов их реакций с материалом вулканических пеплов) с высокотемпературными растворами хлоридного, натриевого типа.

СУКЦЕССИИ БИОТЫ В ОЗ. КАРЫМСКОЕ (1996–2006 ГГ.)

Вулканизм и флюидные потоки вещества и энергии являются мощными поставщиками углерода, азота, фосфора и многих других биологически важных элементов в атмосферу, гидросферу и педосферу Земли. В этом заключается положительная роль вулканизма. Но пароксизмальные, особенно подводные извержения, обычно оказывают губительное воздействие на биоту.

Как показали наши исследования, подводное извержение 1996 г. в Карымском озере привело к длительному депрессивному состоянию по данным 2006 г. всей биоты как непосредственно в самой водной массе озера (площадью около 16 км^2), так и в эфемерных водоемах в узкой зоне прилегающего к нему побережья [7, 8, 13, 20, 21].

Альгофлора Карымского озера до подводного извержения 01.1996 г. являлась типичной для крупных олиготрофных, низкоминерализован-

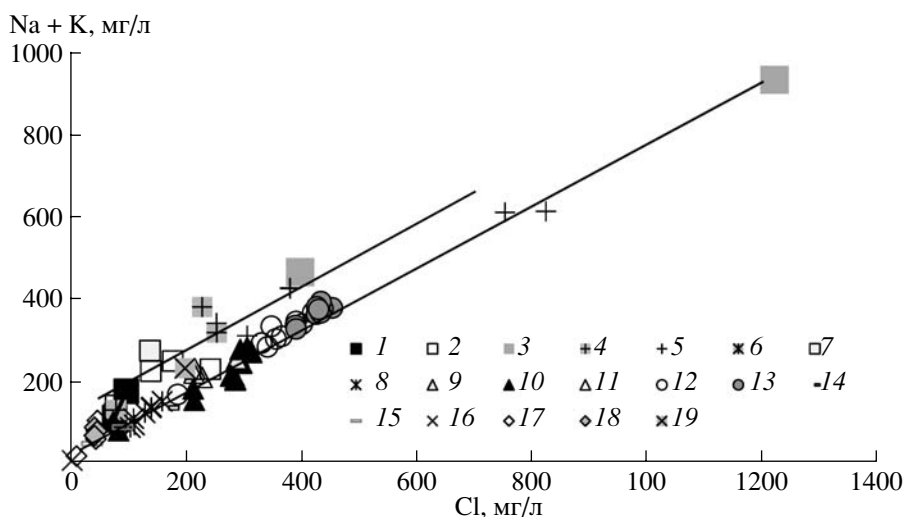


Рис. 9. Диаграмма смешения вод бассейна оз. Карымское по соотношению концентрации ионов $(\text{Na} + \text{K})^+$ и Cl^- . 1 – Донные; 2 – Провальный; 3 – Пийповские; 4 – Разломный; 5 – Сердитый; 6 – Карбонатный; 7 – гейзер Новый; 8 – ист. Зеленые; 9 – центр оз. Карымское (поверхность); 10 – Карымские; 11 – Пляжные; 12 – Маар; 13 – Бурлящий; 14 – Медвежий; 15 – Береговые; 16 – гейзер Старый; 17 – Трещинный; 18 – Холодные; 19 – центр подводного кратера Токарева (поверхность).

ных и низкотемпературных озер Камчатки с субнейтральным рН воды – 7 (рис. 10). В планктонном альгоценозе доминировали представители диатомовых водорослей (*Bacillariophyta*) – *Aulacoseira italica* и *Asterionella gracillima*. Суммарная их численность достигала 280 тыс. клеток на литр. В осенний период субдоминировали 2 вида *Cyclotella* (*C. bodanica* + *C. tripartita*) и *Stephanodis-*

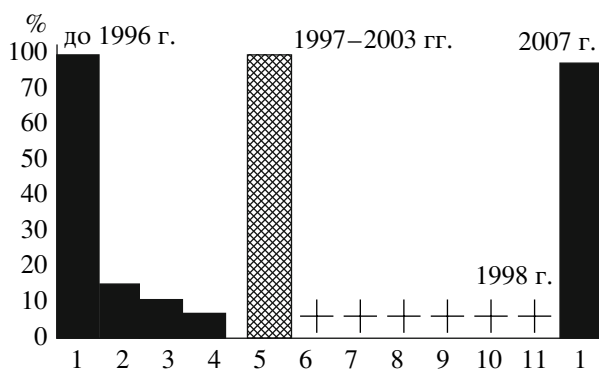


Рис. 10. Гистограмма альгофлоры Карымского озера (по данным планктонного опробования). *Bacillariophyta*: 1 – *Aulacoseira italica*, 2 – *Asterionella gracillima*, 3 – *Cyclotella bodanica* + *C. tripartite*, 4 – *Stephanodiscus cf. invisitatus* – в фотическом слое озера; *Chlorophyta*, *Euglenophyta*: 5 – *Chlamydomonas* sp., *Euglena* sp., *Choricystis chodatii*; *Cyanoprocarvota*: 6 – *Mastigocladus laminosus*, 7 – *Synechocystis parvula*, 8 – *Synechococcus cf. elongatus*, 9 – *Gloeocapsa minuta*, 10 – *Phormidium* sp.sp. – в приповерхностном слое прибрежной зоны озера; *Bacillariophyta*: 11 – *Aulacoseira cf. italica* – локально в приповерхностном слое прибрежной зоны юго-восточного сектора озера; знаком (+) обозначены единичные экземпляры.

cus cf. invisitatus. Это способствовало развитию достаточной плотности планктонных ракообразных и привело к положительному решению проекта интродукции жилой формы кокани – *Oncorhynchus* из Кроноцкого озера, успешно интродуцированной в новый биотоп в 1976 г. [11].

Резкое нарушение равновесия термогидрохимического режима озерной системы в 1996 г. оказало негативное воздействие на гидробионтов. Погибли вся ихтиофауна (~1.5 млн. особей кокани), многовековые альго- и зооценозы.

Летом 1996 г. автохтонный “первичный” пелагический фитопланктон (названный выше) не был обнаружен, также как и представители микрофауны и ихтиофауны. Альгобактериальная биомасса в пелагиали не превышала 0.1 мг/л. Основной ее составляющей в интервале глубин 0–20 м были вселенцы прибрежной зоны – единичные физиологически ослабленные представители синезеленых водорослей (*Cyanoprocarvota*) из родов *Synechocystis*, *Synechococcus*, *Phormidium*, *Mastigocladus*.

Водная толща озерной акватории и в весенне-осенние сезоны 1998–2006 гг. не содержала автохтонных фито- и зооценозов, характерных для времени, предшествовавшего извержению 1996 г.

Первопоселенцами планктона в озере с коротким сроком существования в литоральной зоне, в пределах фотического слоя с величинами рН = 4–5, уже в летние сезоны 1997 и 1998 гг. были ранее не наблюдавшиеся в Карымском озере представители *Euglenophyta* и одноклеточных жгутиковых *Chlorophyta* (последние доминировали с суммарной численностью до 17 млн. клеток/л); им сопутствовали малочисленные и физиологически ослабленные ви-

Таблица 2. Изменение химического состава воды гидротерм кальдеры Академии Наук

Название источника	Дата отбора	T °C	pH	Химический состав: мг/л											Сумма		
				NH ₄ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	F ⁻	H ₃ BO ₃		H ₄ SiO ₄ [*]	H ₄ SiO ₄ ^{**}
Источники Пийповские (№ 1)	09.10.96	89.0	7.76	-	551.0	58.0	124.0	17.0	753.0	509.0	140.3	-	-	53.4	149.0	142.0	2496.6
	03.10.97	86.0	6.70	0.7	547.0	64.5	96.0	29.0	824.0	345.0	162.0	-	0.5	54.4	380.0	-	2503.1
	22.07.01	82.0	7.36	-	387.3	34.9	42.1	9.7	379.9	393.8	81.8	-	1.0	18.0	274.2	-	1622.7
	22.07.02	67.0	8.05	0.1	370.0	54.0	48.1	2.4	379.4	441.9	76.9	-	1.2	28.4	142.0	268.0	1811.2
	17.08.03	73.0	7.60	0.1	314.9	22.6	42.5	6.3	251.8	398.6	80.5	-	1.1	18.5	185.0	142.0	1464.0
Источник Провал	07.08.05	71.8	7.76	0.2	287.0	19.9	46.1	6.1	305.0	306.4	72.0	-	1.1	18.2	179.0	154.9	1395.0
	14.07.06	76.0	7.60	0.1	368.0	16.1	48.9	2.0	241.4	528.0	75.6	-	1.7	17.1	185.4	105.0	1587.6
	21.07.97	96.0	7.80	0.1	849.0	85.0	92.0	2.4	1221.0	317.0	119.5	-	1.1	57.8	161.0	300.0	3205.9
	23.08.03	97.0	6.55	0.3	434.1	28.5	52.1	3.4	397.2	509.1	43.9	-	1.3	27.2	347.0	104.0	1948.1
	09.10.96	86.0	6.90	0.4	201.0	24.0	54.0	14.0	241.0	221.0	137.0	-	0.7	20.0	356.0	-	1269.1
Источники Пляжные	21.07.97	79.0	7.30	0.1	255.0	24.0	48.0	9.7	282.0	240.0	152.0	-	1.7	16.3	390.0	-	1418.8
	14.08.98	64.0	7.64	0.1	225.0	20.0	50.0	4.9	175.7	336.0	98.9	-	1.9	10.9	172.3	104.1	1199.8
	10.09.99	57.2	7.47	0.2	200.0	19.9	39.3	11.3	137.7	345.8	76.9	-	1.1	5.2	179.6	137.8	1154.0
	26.08.03	52.0	7.32	0.1	124.4	11.3	28.9	4.3	76.6	235.6	54.9	-	0.9	7.4	189.0	41.0	774.0
	06.08.05	48.0	7.21	0.1	106.7	7.8	29.7	7.3	74.5	201.7	43.9	-	0.8	1.9	152.6	68.6	695.6
Источники Медвежьи	14.07.06	45.0	7.35	0.1	111.9	5.0	42.1	3.7	73.8	230.4	22.0	6.0	0.7	4.3	120.2	10.0	630.2
	09.10.96	48.0	6.70	0.1	75.0	6.9	12.0	1.9	102.0	1.0	101.0	-	0.4	10.0	158.0	-	468.3
	21.07.97	37.0	7.60	0.1	79.3	8.6	20.0	1.4	109.3	28.8	65.9	-	1.1	8.1	155.0	12.0	489.6
	11.08.98	45.5	7.35	0.1	118.0	13.9	16.8	1.5	139.0	67.2	74.4	-	0.5	12.4	245.9	-	689.7
	12.09.99	38.0	7.33	0.1	115.0	11.9	20.0	1.9	145.6	67.27	6.9	-	1.1	0.4	240.9	48.0	729.0
	14.08.00	37.0	7.34	0.1	114.6	15.3	14.4	1.5	138.3	57.6	76.9	-	-	16.7	234.0	38.0	707.4
Источники Медвежьи	21.07.02	36.5	8.01	0.1	106.0	12.0	18.4	2.4	127.7	76.8	73.2	-	-	16.1	233.0	45.0	710.7
	17.08.03	48.0	7.31	0.1	91.5	12.4	20.0	8.0	107.8	72.0	65.3	-	0.6	12.4	197.0	24.0	611.1
	06.08.05	60.0	6.68	0.2	129.7	16.4	14.4	2.4	157.4	76.8	79.3	-	0.4	20.8	175.6	55.2	728.7
	13.07.06	56.3	7.25	0.1	102.2	7.8	26.1	3.7	120.5	86.5	63.5	-	0.9	8.2	192.9	108.1	720.3

Таблица 2. Окончание

Название источника	Дата отбора	T, °C	pH	Химический состав: мг/л												Сумма	
				NH ₄ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	F ⁻	H ₃ BO ₃	H ₄ SiO ₄ *		H ₄ SiO ₄ **
Источник Карбонатный	24.07.02	93.0	7.83	0.1	190.8	13.8	26.4	0.5	226.9	57.6	239.2	-	-	24.1	246.0	-	1025.4
	18.08.03	96.0	7.10	0.1	211.3	13.3	26.5	1.0	214.5	62.4	245.3	-	0.7	24.1	258.0	112.0	1169.2
	07.08.05	95.0	7.45	0.0	204.7	10.5	26.1	0.7	212.7	45.6	252.6	0.0	1.0	23.4	278.5	156.3	1212.3
Гейзер Старый	18.07.06	97.0	7.80	0.0	214.0	11.8	23.2	0.0	223.7	23.0	244.0	-	-	24.1	252.5	-	1016.4
	10.08.47	98.0	8.70	-	273.0	26.0	9.0	0.0	355.0	92.0	85.0	0.0	-	-	343.0	-	1183.0
	05.08.74	65.0	8.90	0.1	300.0	30.0	2.4	1.5	347.0	84.0	74.0	30.0	2.3	48.0	144.0	-	1063.3
Гейзер Новый	17.04.84	94.0	9.30	0.1	367.0	29.0	3.6	0.1	418.0	105.0	109.0	16.0	-	52.0	512.0	-	1341.8
	10.10.96	98.0	9.10	0.2	275.0	14.0	3.2	0.1	330.0	96.0	51.0	23.0	0.1	30.0	368.0	-	1190.6
	20.07.97	98.0	9.20	0.4	318.0	14.0	6.8	0.2	389.0	106.0	51.0	22.0	2.1	53.0	172.0	200.0	1334.5
	14.09.99	98.0	9.50	0.1	345.0	18.4	18.0	0.2	418.9	105.7	71.4	19.0	-	30.1	176.5	300.0	1503.2
	24.07.02	98.0	9.32	0.1	312.1	23.5	1.6	0.1	400.7	105.7	84.8	12.0	0.3	51.9	191.0	282.0	1465.6
	08.08.05	97.0	9.30	0.1	288.8	16.7	3.6	0.5	365.2	92.2	58.6	22.0	2.1	49.3	184.1	479.7	1563.0
	11.07.06	98.0	9.38	0.0	275.9	12.3	3.6	0.0	329.7	96.1	54.9	27.0	0.9	15.3	225.0	-	1045.7
	10.10.96	98.0	9.20	0.4	318.0	14.0	6.8	0.2	389.0	105.0	51.0	22.0	2.1	53.0	372.0	-	1333.5
	20.07.97	97.0	9.27	0.1	360.0	15.0	6.4	0.1	453.0	96.0	114.7	-	1.9	44.9	177.0	249.0	1518.2
	17.08.98	97.0	8.45	0.1	354.3	18.7	2.8	0.2	436.7	115.3	94.0	1.8	2.2	50.3	147.9	279.1	1453.1
Гейзер Новый	14.09.99	97.0	9.45	0.1	370.02	0.6	3.2	0.2	433.1	105.7	75.1	16.5	-	32.8	195.0	407.7	1660.0
	14.04.00	96.5	9.09	0.2	340.0	21.0	2.4	0.2	412.0	100.8	101.9	7.5	1.9	50.1	205.0	266.0	1509.0
	24.07.01	97.0	9.41	0.0	354.3	23.5	2.0	0.4	426.0	105.7	114.7	-	2.1	36.0	246.9	-	1311.6
	24.07.02	97.0	9.45	0.1	332.2	27.5	2.4	0.2	425.5	105.7	80.5	15.1	-	53.2	203.0	270.0	1515.4
	20.08.03	96.8	9.44	0.1	344.8	17.9	3.0	0.9	432.6	100.9	112.9	1.5	2.1	51.9	223.0	324.0	1615.6
08.08.05	97.2	9.4	90.1	355.1	16.4	3.2	0.2	429.1	105.7	46.4	-	5.9	50.6	189.6	337.6	1575.7	
11.07.06	95.7	9.46	0.0	353.1	14.2	3.6	0.0	439.6	105.7	43.9	36.6	2.0	52.3	227.0	397.8	1675.8	

Примечание. Анализы выполнены в гидрохимической группе ЦХЛ ИВиС ДВО РАН. Аналитики: С.В. Сергеева, А.А. Смышляева, Л.В. Гарцева. – нет данных; H₄SiO₄* – концентрация кремнекислоты в растворенной форме; H₄SiO₄** – концентрация кремнекислоты в коллоидной форме.

Таблица 3. Содержание микроэлементов в термальных водах бассейна оз. Карымское, в мкг/л

Элементы	Гейзер Старый	Слив гейзера Старого	Источник Карбонатный	Источник 1 (ручей Горячий)	Донная разгрузка, $H = 7$ м
	КМЧ-12/05	КМЧ-16/05	КМЧ-21/05	КМЧ-27/05	КМЧ-4/05
Дата	04.08.2005	04.08.2005	07.08.2005	06.08.2005	16.07.2005
$T, ^\circ\text{C}$	92.0	72.0	95.0	71.8	64.0
pH	9.30	9.20	7.45	7.76	6.60
P	н.о.	н.о.	228.000	287.000	301.000
V	8.400	8.200	3.500	5.600	0.600
Mn	1.900	2.200	12.600	84.100	257.000
Fe	34.100	35.400	290.000	323.000	959.000
Cu	0.850	0.900	4.800	6.900	11.800
Zn	2.300	2.200	14.100	28.800	38.100
Ge	21.400	18.900	10.800	17.000	4.400
As	990.000	929.000	577.000	28.800	83.500
Br	0.850	0.850	0.470	0.480	0.160
Sr	38.200	37.200	302.000	115.000	112.000
Ba	4.500	5.000	4.100	20.000	24.800
Pb	0.770	0.140	2.100	2.300	1.700
Li	1348.254	949.324	846.957	553.272	173.030
Rb	73.922	97.109	47.654	44.407	11.710
Y	0.020	0.013	0.013	0.033	0.490
Zr	0.616	0.532	0.334	0.078	0.220
Mo	39.530	36.100	14.096	9.454	7.990
Pd	н.о.	н.о.	1.006	0.960	н.о.
Ag	0.037	0.050	0.018	н.о.	0.090
Cd	0.049	0.049	0.074	0.089	0.240
Sb	31.574	28.700	13.791	0.269	1.660
Cs	106.984	96.110	62.924	5.966	1.360
La	0.014	0.020	0.043	0.635	0.220
W	15.406	12.851	4.997	3.406	1.260
Re	0.225	н.о.	н.о.	0.007	0.010
Pt	0.013	0.013	1.047	1.222	0.220
Au	0.008	0.007	0.005	н.о.	0.010
Tl	0.189	0.167	0.130	0.012	0.004
U	0.003	0.005	0.060	0.011	0.020

Примечание. Анализы выполнены в аналитической лаборатории геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Аналитик В.В. Пухов; н.о. – не определялось.

ды *Bacillariophyta* и *Cyanoprocarvota* из береговой зоны озера. Это явление в озерах Камчатки ранее не отмечалось.

В эпилитоне верхней литорали с весенне-летнего периода 1999 г. (на 4-й год после извержения) доминирующее положение заняли нитчатые формы зеленых водорослей – *Ulothrix* sp. с сопутствующими *Microspora tumidula*, *Enteromorpha intestina-*

lis. Ранее эта группировка в озере также не отмечалась. Открытием является обнаружение в 1999 г. на дне кратера Токарева холмообразных колоний синезеленых водорослей, в ассоциации с которыми описан новый вид анаэробных карбоксидотрофных бактерий, использующих окись углерода вулканического происхождения в качестве источника энергии, и выделяющих водород [24].

С 2000 г. биотоп автохтонного диатомового планктонного комплекса, существовавшего в озере до извержения 1996 г., занял развивающийся линзовидно (?) *Choricystis chodatii*. Численность его колебалась, достигая максимальной (до 61 млн. клеток/л) в эпинеестоне и гипонеестоне прибрежной зоны озера в марте 2003 г. При обследовании озера в 2006 г. этот планктонер не был обнаружен.

Фитобентические озерные ассоциации, обнаруженные в 2000 г. и подтвержденные затем в 2005 г. в северной части подводного кратера Токарева (на глубинах 2–20 м), представлены локальными, но “высокомассовыми” участками развития весьма необычного для озер вселенца – мха *Pohlia filum* (определение биолога И. Чернядьевой, БИН РАН). Названному виду сопутствовали *Pohlia* sp., нитчатая форма водоросли *Chlorophyta* – *Microspora stagnorum*, *Rhizoclonium hieroglyphicum*, а также вселенцы из береговой зоны озера диатомовые *Nitzschia*, *Navicula* и др.

По водолажным наблюдениям 2000–2007 гг. наиболее плотные покрытия фитобиотой отмечаются на участках литорали с уменьшенным влиянием волнового перемешивания (глубины 9–20 м). Это зафиксировано не только в литорали кратера Токарева, но и в восточном и в юго-восточном секторах озерной ванны самого озера. Визуально в летний период 2006 г. первое место по биомассе занимали в названных участках представители мхов рода *Pohlia*. Субдоминантами в бентических биоценозах (в основном сопутствующими мху) являлись представители нитчатых форм *Chlorophyta* из семейства улотриксковых. Ограничивающими факторами развития названных представителей бентической фитобиоты являются подвижность грунта (терригенный снос, оползни) и интенсивность выпадения тонкой пироклаستيку, несколько снижающей процесс фотосинтеза.

Представители простейших – сувойка, парамеции (*Paramecium*) эпизодически наблюдались с 1998 г. редкими экземплярами в пенообразном метафитоне по береговой кромке озера (шириной до 5 м) близ термальных источников Академии Наук. В 2003 г. единичные экземпляры сувоек и парамеций наблюдались в отстойных планктонных мартовских и июльских пробах. При культуральных исследованиях январских проб 2002 г. с *Charicystis chodatii* В.М. Андреевой (БИН РАН) наблюдалось его поедание выше названными простейшими, что является примером новой сукцессии и восстановления или формирования одного из первых звеньев трофической цепи в посткатастрофический период существования озера.

В апрельских бентосных пробах 2004 г. из прибрежной зоны северного берега кратера Токарева присутствовали мелкие нематоды и хиронамиды. В летний сезон 2005 г. выявлена значительная численность *Pagastia orientalis*. Наиболее “богатые”

в систематическом отношении и по численности были локально формирующиеся биоценозы в северном обрамлении п-ва Новогодний (в истоке руч. Горячий), здесь в мелком водоеме с 2000 г. в воде с практически круглогодичной температурой 23–26°C и величиной pH = 7–8 развиваются пресноводные клещи гр. *Hydrochenella*, ракушковые раки подотряда *Ostracoda*, водяные клопы (рода гладыш – *Notonecta*), круглореснитчатые инфузории (*Vorticella*).

В южном секторе озера в районе разгрузки термальных источников Академии Наук в летний период 2000 г. впервые отмечены единичные экземпляры личинок *Acantocyclops vernalis*. Этот вид обитал в озере до подводного извержения 1996 г. В марте 2003 г. в планктонном биоценозе центральной части акватории озера обнаружены *Cyclops* sp. и *Bdelloidea* sp. (соответственно 7 и 884 экз./м³), ранее в нем не отмечавшиеся. В апреле 2004 г. обнаружен *A. vernalis* с низкой численностью (7.84 экз./м³) в валовых сетяных пробах из глубоководных станций озерной ванны и подводного кратера Токарева. В 2005 г. сообщество ракообразных пополнили еще два вида: *Eucyclops serrulavus* и *Diacyclops nanus*.

Впервые для кратерных озер Камчатки Е.Г. Лупикиной (ИВиС ДВО РАН) описан видовой состав альгофлоры Карымского озера, восстанавливающегося после катастрофического извержения. Всего было обнаружено (по состоянию на 2003–2006 гг.) 108 видов водорослей, относящихся к 58 родам 32 семейств, 6 отделов [13]. В целом, основные альгоценозы Карымского озера – планктонный и бентический на десятом году после катастрофического извержения имели аллохтонный характер. Автохтонными представляются лишь группировки мелких водоемов (луж) на расширившейся пляжной зоне, ручьев и в зоне высачивания гидротерм на термальных площадках. Процентное участие бактериальной и альгологической компоненты на уровне отделов по секторам озера на 2006 г. представлено на рис. 11.

Ацидификация вод Карымского озера, вызванная фреатомагматическим извержением 1996 г. и продолжающимся поступлением эндогенного флюида, представляется определяющим и сдерживающим фактором развития диатомовой флоры предкатастрофического периода. Именно она реагирует на уменьшение величины pH. В этом отношении является показательной высокая численность в планктоне 2000–2003 гг. *Charicystis chodatii* (Jaag) Fott, характерного для почвенного и озерного биотопов [1] и не отмечавшегося в озере ранее.

Альгологическое опробование водной толщи в центральной части озера (станция S₂ сетевым методом в весенний период 2007 г.) показало значительную численность диатомовых водорослей, в том числе, характерных для планктонной ассо-

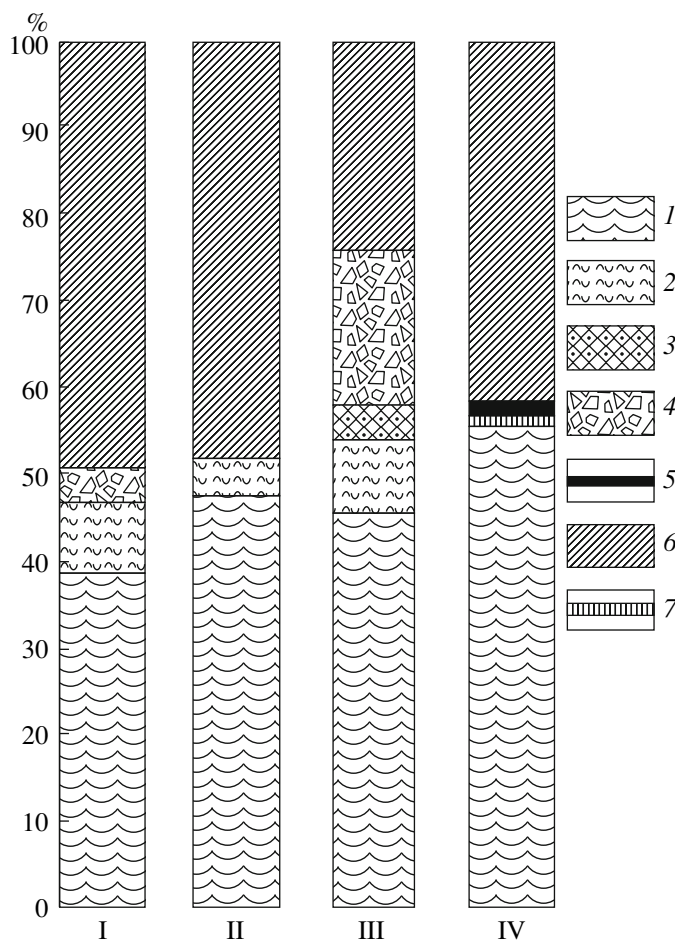


Рис. 11. Процентный состав альгобактериальных бентосных гидробионтов прибрежной зоны оз. Карымское (2005 г.). 1 – *Cyanoprocarota*; 2 – *Chlorophyta*; 3 – *Xantophyta*; 4 – *Euglenophyta*; 5 – *Rhodophyta*; 6 – *Bacillariophyta*; 7 – *Chrysophyta*. Римскими цифрами обозначены секторы озера: I – северный, II – северо-восточный, III – юго-восточный, IV – южный.

циации предкатастрофического периода: с доминирующим положением (по данным световой микроскопии) *Aulacoseira italica* (= *A. subarctica*?) и сопутствующих ей кодоминантов *Cyclotella bodanica*, *C. tripartita*, *Stephanodiscus minutulus*. Суммарная численность диатомей (25850 млн. кл./м³) свидетельствует о наступлении благоприятных гидрохимических условий для их развития.

По нашим представлениям названные представители диатомовой флоры находились длительное время (11 лет) в состоянии глубокого покоя. Определяющим фактором для их восстановления явилось повышение pH воды озера, включая ее придонные слои (до pH = 6–7).

Таким образом, в осенне-зимний период 2007 г. нами фиксируется новая сукцессия в развитии диатомовой флоры, свидетельствующая о динамике гидрохимического режима и о восстановлении

условий, соответствующих режиму предкатастрофического периода в центральной части озера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексные исследования в период 1996–2006 гг. показали, что за 10 лет после катастрофического подводного извержения в северном секторе кальдеры Академии Наук экосистема бассейна оз. Карымского претерпела существенные изменения. Изучена динамика гидрохимических характеристик водной массы, локализованной в новообразованном кратере Токарева и в основной акватории оз. Карымское. Прослежено изменение химического состава воды термальных источников обрамления Карымского озера и состояние зон подводных разгрузок гидротерм в кратере Токарева. Впервые получены данные по содержанию микроэлементов в термальных водах Карымского бассейна. Выполненные биологические исследования позволили установить длительную депопуляцию диатомового планктона предкатастрофического периода в озере. Регенерация многовекового комплекса планктонной фитокомпоненты докатастрофического периода (до 1996 г.) зафиксирована в апреле 2007 г., на фоне повышения pH и уменьшения общей минерализации водной толщи озера. Подмечено, что влияние аллохтонной компоненты на фитоценозы озерной биоты не однозначны по секторам озера, но несомненно связаны также гидрологическими и метеорологическими условиями: волновым перемешиванием, терригенным сносом, поступлением инфильтрационных вод, подводными оползнями.

По результатам комплексных исследований в период 1996–2006 гг. можно сделать следующие выводы.

1. После извержения 1996 г. происходит постепенное разбавление воды озера Карымского и монотонное повышение pH.

2. В кратере Токарева устойчиво, по всему разрезу водной толщи, наблюдается более высокая температура (в среднем на 1°C) по сравнению с остальной акваторией озера.

3. Как в кратере Токарева, так и в акватории оз. Карымское в интервале глубин 15–25 м за весь период наблюдений сохраняются повышенные содержания растворенного кислорода, на 4–5 мг/л превышающими фоновые. В придонной зоне сохраняется повышенное содержание бора.

4. В оз. Карымское с 1998 г. отмечается стратификация воды по общей минерализации. Придонная вода отличается более высоким содержанием Na, Ca, Mg, Cl, SO₄.

5. В термальных источниках Пийповских (источник 1, ручей Горячий) и пляжных выходах постепенно снижается концентрация сульфат-иона и возрастает содержание гидрокарбонат-иона.

6. Со временем наблюдается заметное снижение температуры, дебита, газоотделения и минерализации прибрежных термальных источников (Пляжных, Медвежьих и др.).

7. После извержения 1996 г. в воде термальных источников и особенно в воде озера Карымского появился Mg, что можно связать как с поступлением его с пепловой компонентой извержения (в том числе и от вулкана Карымский), так и с потоком магматических флюидов, разгружающихся на дне озера.

8. По состоянию на 2005 г. биоразнообразие водорослей в бассейне оз. Карымское в последнее время увеличилось на 18,5%, в основном за счет видовой разнообразия бентических *Bacillariophyta* альгогидропсаммона, установленного при изучении псаммитовых разностей осадков и узколокальных биоценозов. По альгокомпоненте водной толщи озера и его литоральной зоны заселение идет медленно и локально.

9. В период 2004–2005 гг. уменьшилось видовое разнообразие в водной толще *Cyanoprocarota* в среднем на 6,67%; *Chlorophyta* – на 6,42%, на фоне увеличения на 12% видовой состава *Bacillariophyta*, *Eugleophyta* – на 1% и *Xantophyta* – на 0,7%.

10. Постепенному развитию планктонной компоненты экосистемы оз. Карымское способствовало заметное расщелачивание его водной массы и уменьшение содержания в воде Fe, Mg, Al, S. Наиболее развитым в 2000–2006 гг. типом бентического фитоценоза непосредственно в образовавшемся в результате извержения 1996 г. кратере Токарева (северный сектор оз. Карымское) была ассоциация *Microspora stagnorum* (*Chlorophyta*) на куртинах мхов *Pohlia filum* (*Schimp.*) *Maort. et Pohlia* sp.

Авторы благодарят за сотрудничество и многолетнюю помощь по определению беспозвоночных оз. Карымское научных сотрудников Камчатского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии Т.В. Бонк, Т.Н. Травину, Т.Л. Введенскую, а также за большую техническую помощь в проведении подледного биогидрохимического опробования водной толщи озера сотрудников Института вулканологии и сейсмологии С.В. Ушакова, А.Г. Маневича, Д.Ю. Кузьмина, за проведение водолазных работ С.А. Чиркова, А.В. Кошелева, А.Ю. Федосеева, за проведение биогидрохимического опробования и картирование точек отбора в течение многих лет сотрудника Камчатского Управления Гидрометеослужбы В.О. Марущака.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президиума РАН 06-1-П16-063 и РФФИ № 05-05-64789а, 05-05-64791а, 05-05-64792а и 06-05-72550-НЦНИЛа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева В.М. Почвенные и аэрофильные зеленые водоросли (*Chlorophyta: Tetrasporales, Chlorococcales, Chlorosarcinales*). СПб.: Наука, 1998. 351 с.
2. Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф. Гидротермы Карымского озера после подводного извержения 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4. С. 3–27.
3. Вергасова Л.П., Карпов Г.А., Лупкина Е.Г. и др. Постэруптивная деятельность в кальдере Академии Наук (Камчатка): минеральные новообразования, содержание радона в спонтанных газах и биотические 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. Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура) / Под ред. Масуренков Ю.П. М.: Наука, 1980. 292 с.
6. Гавриленко Г.М., Гавриленко М.Г. Изменение отношений макрокомпонентов в термальных водах вулкана Мутновский, предшествующие его активным фазам (Камчатка) // Подземная гидросфера: Матер. Всероссийского совещ. по подземным водам Востока России. Иркутск: ИрГТУБ, 2006. С. 17–20.
7. 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.
8. Карпов Г.А., Лупкина Е.Г. Андреев В.И., Самкова Т.И. Воздействие вулканизма на окружающую среду (на примере извержений в кальдере Академии Наук и вулкана Карымский) // Вестник ДВО РАН. 2007. № 2. С. 83–99.
9. Карпов Г.А., Николаева А.Г., Лупкина Е.Г. и др. Особенности гидрохимического и геохимического состава вещества бассейна озера Карымское в посткатастрофический период (1996–2005 гг.) / Материалы научно-технической конференции 17–18 января 2006 г. Петропавловск-Камчатский. 2006. С. 207–217.
10. Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М. Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53–70.
11. 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.
12. Леонов В.Л. Поверхностные разрывы, связанные с землетрясением и извержениями, произошедшими в Карымском вулканическом центре 1–2 января 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 113–130.
13. Лупкина Е.Г. Восстановление биоты в посткатастрофический период извержения вулканов (сукцессии альгоценозов озера Карымское в 1996–

- 2003 г.) // Вулканология и сейсмология. 2005. № 1. С. 37–43.
14. 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.
 15. Николаева А.Г., Карпов Г.А., Лупкина Е.Г. и др. Эволюция солевого состава воды термальных источников и Карымского озера после извержения 1996 г. / Матер. ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога 30 марта – 1 апреля 2005 г. Петропавловск-Камчатский. 2005. С. 37–47.
 16. Сеников С.Л., Нуждина И.Н., Дроздина С.Я., Кожевникова Т.Ю. Исследования активности вулкана Карымский дистанционными методами в 2001–2005 гг. / Матер. научно-технической конференции 17–18 января 2006 г. Петропавловск-Камчатский. 2006. С. 202–207.
 17. Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов Е.П. Методы анализа природных вод. М.: Недра, 1970. С. 115–116.
 18. 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.
 19. 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. 3–38.
 20. Федотов С.А., Муравьев Я.Д., Иванов Б.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 и климата): Избр. науч. тр. / Под ред. Добрецова Н.Л., Коваленко В.И. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ, 1997. 350 с.
 21. Федотов С.А., Озеров А.Ю., Магуськин М.А. и др. Извержение Карымского вулкана в 1998–2000 гг., связанные с ним сейсмические, геодинамические и поствулканические процессы, их воздействие на окружающую среду // Катастрофические процессы и их влияние на окружающую среду. Вулканизм. Т. 1. М.: Наука, 2002. С. 117–160.
 22. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидродинамические и гидрогазохимические вариации параметров режима подземных вод в периоды подготовки и реализации Кроноцкого землетрясения 05.12.97 г. // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский. 1998. С. 134–147.
 23. Karpov G.A., Esikov A.D. Isotope geochemistry of thermal springs in the Karymsky geothermal areas, Kamchatka, Russian Federation // Use of isotope techniques to trace the origin of acidic fluids in geothermal systems (International Atomic Energy Agency-IAEA), Vienna, Austria. 2005. P. 133–154.
 24. Kolganova T.V., Kamzolkina O.V., Karpov G.A. Bonch-Osmolovskaya E.A. Carboxidocella sporoproducens sp. nov., a novel anaerobic CO-utilizing / H₂-producing thermophilic bacterium from a Kamchatka hot spring // International J. of Sistematic and Evolutionary Microbiology. 2006. V. 56. 2006. P. 797–800.

The Time-Dependent Variation of Hydrogeochemical Characteristics, Thermal Regime, and Biocenoses in the Fresh and Thermal Waters of the Lake Karymskii Basin Following the Catastrophis Underwater Eruption of 1996 in the Akademii Nauk Caldera, Kamchatka

G. A. Karpov¹, E. G. Lipikina¹, A. G. Nikolaeva¹, A. Yu. Bychokov²,
S. A. Lapitskii², I. Yu. Nikolaeva²

¹Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Scieces,
Petropavlovsk-Kamchatskii, 68006, Russia

²Faculty of Geology, Lomonosov State University, Moscow, 119899, Russia

Results of biohydrogeochemical monitoring are used to study time-dependent variations in the hydrogeochemical characteristics of the Lake Karymskii water mass, the state and characteristic of underwater discharge zone in the Tokarev crater appearing in 1996, a hydrogeochemical characteristic of thermal springs around the lake, and the biota succession in the lake for the period 1996–2006 (2007). We detected a stratification in the chemical composition of water over depth and the presence of persistent zones of increased dissolved oxygen zones. We found an alkalization of lake water and a decrease in its total mineralization. The new thermal springs and underwater discharges of thermal water and gases are found to continue. First data have been obtained on the concentration of microelements in the thermal springs of the Karymskii basin. The biodiversity of algae in Lake Karymskii was largely increased by the species diversity of benthic *Bacillariophyta*. The plankton phytocomponent of the precatastrophic period was found to be regenerated in the lake in April 2007.