

УДК 639.312:631.8

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗЕРА КУРИЛЬСКОЕ В 2002 Г.

Т. К. Уколова, В. Д. Свириденко



Охарактеризована сезонная изменчивость количества осадков и уровня воды в истоке р. Озерная в 2002 г., а также межгодовая изменчивость поступления фосфора с производителями нерки. Проанализированы сезонная и межгодовая динамика биогенов, их вертикальное распределение, рассмотрены содержание и соотношение различных форм азота и фосфора. В 2002 г. возросло содержание фосфора, аммонийного азота, кремния и наблюдается постепенное снижение содержания нитратов. Для водоёма характерна несбалансированность соотношения N:P.

T. K. Ukolova V. D. Sviridenko. Hydrology-chemical regime of the lake Kurilskoye in 2002 // Research of water biological resources of Kamchatka and of the northwest part of Pacific Ocean: Selected Papers. Vol. 7. Petropavlovsk-Kamchatski: KamchatNIRO. 2004. P. 70–78.

Seasonal variations of atmospheric precipitates and water level in the Ozernaya River outlet in 2002 and either interannual variations of phosphorus input from adult carcasses have been characterized. Seasonal and interannual dynamics, and vertical distribution of biogens have been analyzed; content and ratio between nitrogen and phosphorus of different state have been studied. In 2002 the content of phosphorus, ammonium nitrogen and silicon has been increased, and a gradual reduce of nitrates content has been observed. A misbalanced ratio N:P is found characteristic for this lake.

Курильское озеро является местом нереста и нагула озерновского стада нерки, поэтому исследование гидрохимического режима этого водоёма является неотъемлемой частью мониторинга его экосистемы. Результаты 20-летнего гидрохимического мониторинга экосистемы оз. Курильское подтвердили незначительную межгодовую изменчивость кислородного и биогенного режимов водоёма (Уколова, Свириденко, 2002). Сезонная динамика биогенных элементов определяется внутриводоёмными процессами (Синяков, 1993; Сапожников и др., 2002). В 2002 г. гидрохимические исследования водоёма проводились по наиболее полной программе, позволившей детально проанализировать сезонную динамику содержания и вертикального распределения биогенов (фосфора, азота, железа, кремния) в зависимости от количества осадков, поступления аллохтонной органики, степени развития фитопланктона и рассчитать соотношение минеральных и органических форм азота и фосфора.

Целью работы является характеристика сезонной изменчивости гидрохимического режима озера в 2002 г., для которого имеются наиболее полные данные по содержанию биогенов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом для настоящей работы послужили данные гидрохимических исследований экосистемы оз. Курильское в 2002 г. Пробы воды для гидрохимического анализа отбирали 1–2 раза в месяц по стандартным горизонтам (0, 2, 5, 7, 10, 15, 20, 40, 70, 100, 150 и 200 м) на центральной станции озера. Средневзвешенные величины содержания биогенных элементов (для периода с июня по ноябрь) рассчитывали для эвфотического слоя 0–40 м и слоя 0–200 м, зоны обитания зоопланктона. Толщину эвфотического слоя рассчитывали согласно схеме Кларка-Дентона (Парсонс и др., 1982). Межгодовая динамика биогенных элементов рассмотрена для периода лет (1996–2002 гг.) с наиболее полными данными по их содержанию в вегета-

ционный период (июнь–ноябрь). Материалы по содержанию нитратов имеются для 1997, 1999–2002 гг. Определение фосфатного фосфора, аммония, нитритов, нитратов, общего железа и кремния проводили в соответствии с руководством (Алекин и др., 1973), общих форм фосфора и азота — по методике ВНИРО (Справочник..., 1991). Органические формы азота и фосфора определяли по разности между количеством общих и минеральных форм. Содержание фосфора (P_2O_5) в теле нерки принимали равным 0,28% от биомассы отнерестовавших рыб (Кизеветтер, 1948). Данные по количеству осадков и уровню воды в истоке р. Озерная получены по наблюдениям на метеопосту Озерновского наблюдательного пункта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Озеро Курильское расположено в зоне избыточного увлажнения, поэтому в формировании его гидрохимического режима большое значение имеют количество осадков и объём поверхностного стока (Пономарёв и др., 1986; Степанов, 1986). Так как исследуемый водоём является местом нереста и нагула озерновского стада нерки, существенное влияние на содержание в воде биогенов имеет количество отнерестовавшей нерки, трупы которой после минерализации являются важным источником биогенов, в основном фосфатов (Juday et al., 1932; Ricker, 1937; Крохин, 1957, 1958, 1959, 1967; Крохин, Крогиус, 1937).

К о л и ч е с т в о о с а д к о в. Годовая сумма осадков в бассейне оз. Курильское в 2002 г. составила 1158 мм, что значительно превышало среднюю величину за последние 20 лет (883 мм) (Миловская, 2002). Внутригодовая динамика количества осадков в бассейне оз. Курильское в 2002 г. характеризовалась наличием весеннего (в марте) и осеннего (в ноябре) максимумов (рис. 1). Наименьшее количество осадков наблюдали в мае.

У р о в е н ь в о д ы. Уровень воды в истоке р. Озерная в течение года изменялся в диапазоне от 50 до 114 см (рис. 2). Среднегодовая величина этого

показателя составила 76,1 см (среднее значение за 59 лет равно 71,1 см) (Миловская, 2002). Пик половодья приходился на июнь, наступление осенней межени наблюдалось в октябре.

Поступление фосфора в озеро с отнерестовавшими производителями нерки. В 2002 г. с заходом 2635 тыс. штук производителей нерки средней массой 2,68 кг (по сообщению В.А. Дубынина) в озеро поступило 19,8 т P_2O_5 или 8,71 т Р. Поступление фосфора с отнерестовавшей неркой в 2002 г. уступало только поступлению фосфора с производителями 1984–1985 гг., 1987 г. и 1990 г. (рис. 3).

Сезонная динамика содержания биогенных элементов. Сезонная динамика содержания биогенов, оценённая по средневзвешенным величинам, представлена в таблице 1 (а — в слое 0–40 м, б — в слое 0–200 м).

Содержание минерального фосфора. Содержание минерального фосфора в оз. Курильское в течение года изменялось от аналитического нуля до 28 мкг Р/л, в основном от следовых величин до 10 мкг Р/л, что типично для олиготрофных водоёмов (Thomas, 1953). Высокие величины его концентрации отмечены в июне и середине ноября, потребление до аналитического нуля — в начале ноября и декабре. Зимний максимум в слое 0–200 м зафиксирован в феврале (11 мкг Р/л). В период с марта по май его количество в воде озера составляло 4–5 мкг Р/л.

Наличие повышенного содержания минерального фосфора в июне, в период активной вегетации водорослей, обусловлено, вероятно, поступлением фосфатов с поверхностным стоком (уровень воды в

р. Озерная в июне достиг максимума). В конце июня, когда биомасса аулякозеиры в 2002 г. (по сообщению Т.В. Бонк) была наибольшей, потребление фосфатов превысило их поступление, что привело к резкому снижению содержания минерального фосфора. Рост содержания фосфатов, отмеченный в августе, когда в развитии фитопланктона наблюдали второй летний пик, образовался на фоне постепенного увеличения количества осадков (рис. 1) и поступления этого биогенного элемента с поверхностным стоком, а также в результате регенерации фосфатов из отмершего планктона. Содержание фосфатов вновь стало возрастать с середины октября (9 мкг Р/л) и было обусловлено минерализацией сненки. Основной заход производителей нерки продолжался до конца августа, а минерализация органического вещества сненки в водоёме происходит, по сообщению В.В. Сапожникова, предположительно 2 месяца, поэтому пик поступления фосфатов от отнерестившихся рыб приходился на октябрь.

В ноябре содержание фосфатов было наиболее изменчивым — от следовых количеств в середине ноября до максимально высокого содержания, 21 мкг Р/л, в конце месяца — и происходило на фоне затухания вегетационных процессов и активизации осеннего паводка. Наличие максимума фосфатов свидетельствует о превалирующем значении паводковых вод в этот период над остальными составляющими, определяющими его сезонную динамику. Уровень воды в реке в ноябре был наибольшим за осенне-зимний период, а количество осадков — максимальным за год (рис. 1 и рис. 2).

Наблюдавшееся периодическое увеличение и снижение содержания фосфатов обусловлено совокупностью процессов поступления и потребления. В целом, динамика средневзвешенного содержания фосфатов в эвфогическом слое 0–40 м и в слое 0–200 м была сходной (табл. 1). Сравнительный анализ межгодовой изменчивости содержания фосфатов за вегетационный сезон 1996–2002 гг. показал, что наибольшее количество фосфатов в слое 0–200 м отмечено в 1998 г., в дальнейшем происходило снижение средневзвешенных величин содержания фосфатов в слое 0–200 м по 2000 г. (рис. 4). В слое 0–40 м сравнительно высокое (для условий оз. Курильское) средневзвешенное содержание фосфатов отмечалось в 1999 г. В 2001–

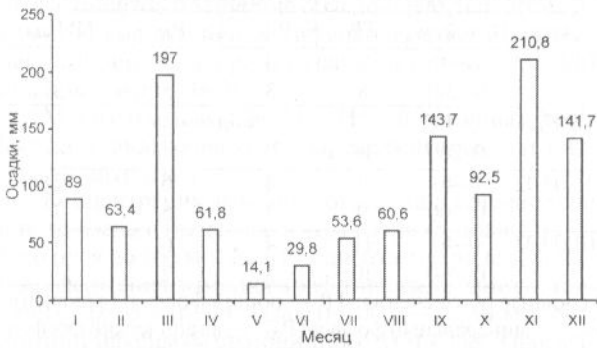


Рис. 1. Сезонная динамика осадков в 2002 г. в бассейне оз. Курильское

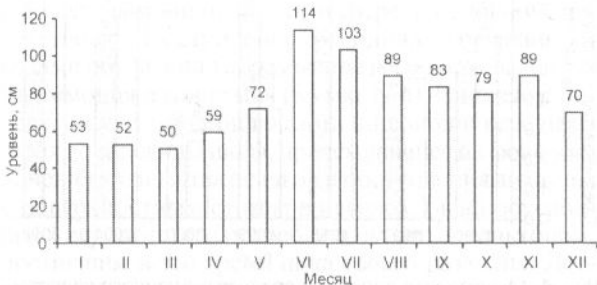


Рис. 2. Внутригодовая динамика уровня воды в р. Озерная в 2002 г.

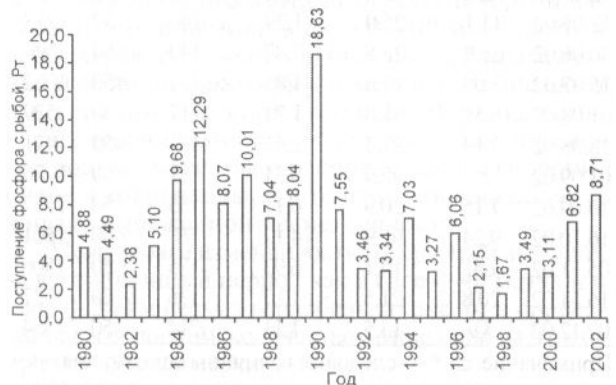


Рис. 3. Поступление фосфора в оз. Курильское с нерестующими производителями нерки

2002 гт. средневзвешенное содержание фосфатов как в слое 0–200 м, так и в слое 0–40 м возросло и было сопоставимым.

Общий и органический фосфор. Развитие водорослей в водоёме обусловлено не только содержанием растворённого минерального фосфора в воде в данный момент, но и наличием в круговороте всех его форм, что связано с высокой оборачиваемостью фосфатов (Максимова, 1964). В оз. Курильское время оборота фосфора составляет 6–10 часов, по сообщению В.В. Сапожникова, что обеспечивает довольно высокую первичную продукцию органического вещества на его рециклинге. В середине июля 2002 г. средневзвешенная величина содержания общего фосфора в эвфотическом слое и в слое 0–200 м была одинаковой — 9 мкг Р/л (табл. 2).

Таблица 1. Сезонная динамика биогенных элементов в оз. Курильское в 2002 г. в слоях 0–40 (а) и 0–200 (б) м

а Средневзвешенное содержание в слое 0–40 м, мкг/л						
Дата	Ингредиенты, мкг/л					
	P-PO ₄	N-NH ₄	N-NO ₂	N-NO ₃	Fe	Si
14.01.02	3,1	14,1	3,1	129	<50	2289
17.02.02	11,0	21,0	6,8	94	<50	2055
02.03.02	сл.	сл.	4,3	84	<50	1633
21.04.02	5,7	0	1,6	130	<50	1475
22.05.02	5,5	20,4	1,0	148	54	1745
12.06.02	10,6	3,8	1,3	150	<50	1129
30.06.02	сл.	15,8	2,9	139	<50	995
15.07.02	сл.	19,3	2,4	134	<50	1075
01.08.02	5,2	42,6	2,1	108	<50	1490
18.08.02	8,6	33,7	4,8	132	<50	1409
01.09.02	4,4	30,8	3,1	181	<50	1598
16.09.02	6,4	23,5	10,9	160	<50	1744
16.10.02	10,2	62,6	6,0	107	<50	1674
05.11.02	сл.	21,0	6,2	174	<50	1453
16.11.02	21,4	15,2	9,9	130	52	1673
02.12.02	сл.	28,3	1,6	218	<50	1328

б Средневзвешенное содержание в слое 0–200 м, мкг/л						
Дата	Ингредиенты					
	P-PO ₄	N-NH ₄	N-NO ₂	N-NO ₃	Fe	Si
14.01.02	3,4	2,83	2,19	148	<50	2010
17.02.02	10,6	32,3	4,45	92	<50	2027
02.03.02	4,32	сл.	7,63	82	<50	1671
21.04.02	4,97	0	2,29	127	<50	1618
22.05.02	5,02	82,8	0,62	148	60	1809
12.06.02	11,1	25,0	1,29	146	<50	1218
30.06.02	сл.*	22,5	2,87	140	<50	986
15.07.02	3,09	15,6	1,85	133	<50	1052
01.08.02	6,31	41,8	1,71	117	<50	1529
18.08.02	7,19	37,1	2,67	133	<50	1421
01.09.02	сл.	42,9	3,31	181	<50	1720
16.09.02	7,15	20,9	6,11	153	<50	1757
16.10.02	9,24	91,3	4,12	97	<50	1801
05.11.02	сл.	14,1	6,93	175	<50	1506
16.11.02	20,8	21,5	10,7	136	<50	1627
02.12.02	3,9	13,5	1,11	214	<50	1354

Примечание. сл.* — следовые величины содержания биогенных элементов, находящиеся ниже предела чувствительности применяемого метода определения

Диапазон изменений концентрации общего фосфора в слое 0–200 м составлял 5–11 мкг Р/л. Соотношение TP:P_{мин.} в слое 0–200 м в июле 2002 г. было значительно ниже, чем в соответствующий период 2001 г.; когда органический фосфор значительно преобладал над минеральным. В сентябре 2002 г. количество минерального фосфора было на уровне 2000 г., органического фосфора было больше — 7 и 6 мкг Р/л, соответственно, в слоях 0–40 м и 0–200 м (табл. 2).

По имеющимся данным, вертикальная стратификация содержания общего фосфора наиболее выражена в слое 0–40 м, ниже отмечено постепенное снижение содержания до 6 мкг Р/л на глубине 200 м (рис. 5). В середине лета почти во всём исследуемом слое 0–200 м (за исключением глубин 2, 20 и 200 м) органический фосфор преобладал над минеральным, что указывает на увеличение количества автохтонного и аллохтонного органического вещества в водоёме в этот период и активное потребление минерального фосфора.

Характер вертикального распределения общего и органического фосфора был сходным. В начале сентября концентрация общего фосфора оз. Курильское была выше, чем в июле — 8–14 мкг Р/л. В сентябре накопление всех форм фосфора происходило на фоне значительного поступления в озеро органического вещества аллохтонного происхождения (количество осадков было максимально высоким за летне-осенний период) и минерализации остатков животных и растительных организмов в самом водоёме. В вертикальном распределении общего фосфора в сентябре, как и в середине июля, отмечена большая вариация

Таблица 2. Средневзвешенные величины содержания различных форм фосфора (мкг Р/л) в оз. Курильское в 2000–2002 гг.

Дата	Слой, м	TP	P _{мин.}	P _{орг.}	TP:P _{мин.}
01.09.00	0–40	9	4	5	2
	0–200	8	3	5	3
15.07.01	0–40	нет данных			
	0–200	18	2	16	8
15.07.02	0–40	9	4	6	2
	0–200	9	3	5	3
01.09.02	0–40	11	4	6	3
	0–200	10	3	7	3

Условные обозначения: TP — общий фосфор (валовый); P_{мин.} — минеральный фосфор; P_{орг.} — органический фосфор

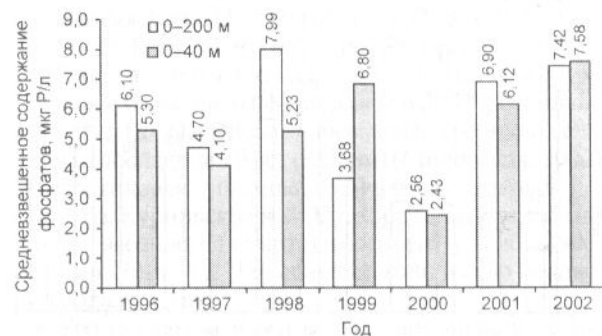


Рис. 4. Межгодовая динамика средневзвешенного содержания фосфатов в слоях 0–40 м и 0–200 м в вегетационный сезон

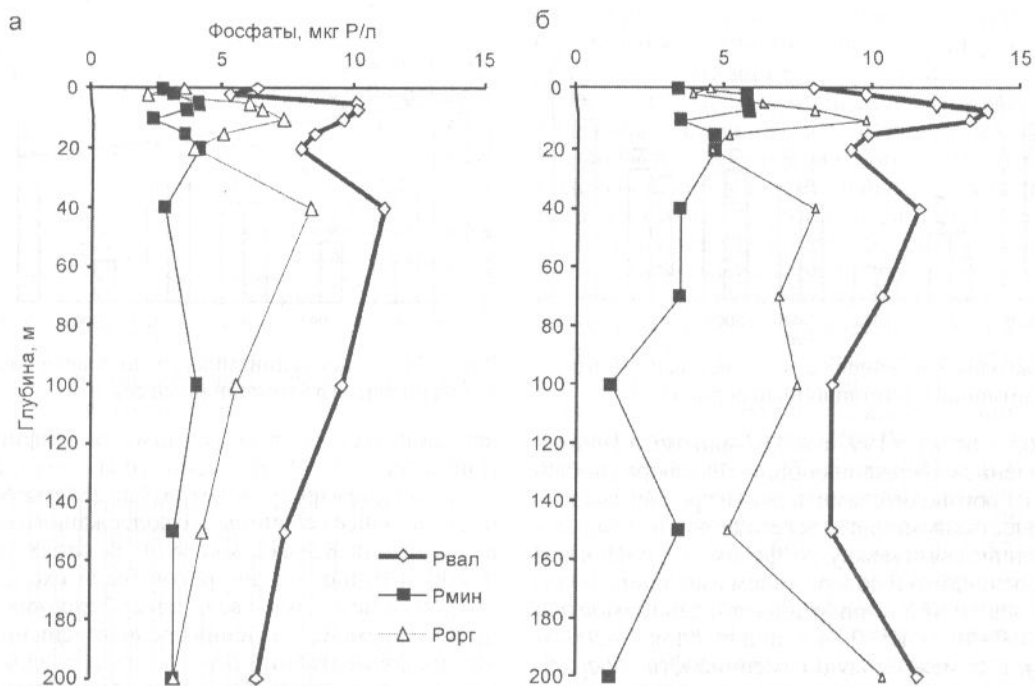


Рис. 5. Вертикальное распределение различных форм фосфора в оз. Курильское 15 июля (а) и 1 сентября (б) 2002 г.

бельность содержания в верхнем 40-метровом слое. Ниже этого слоя его содержание уменьшалось, но с глубины от 150 м и до 200 м — увеличивалось до 12 мкг Р/л, что, возможно, было обусловлено накоплением большого количества отмерших организмов, обычно концентрирующихся на данных глубинах в виде взвеси. Неравномерное распределение биогенных элементов по глубине обусловлено, наряду с динамикой вод, различной интенсивностью биохимических процессов, происходящих в толще воды (Сапожников и др., 2002).

Минеральный азот. Из минеральных форм азота в водной толще озера определяли аммоний, нитриты и нитраты.

Концентрация аммонийного азота в течение года в воде озера изменялась в диапазоне от аналитического нуля до 166 мкг N/л. Средневзвешенные величины содержания аммония в эвфотическом слое составляли — 0–63 мкг N/л, в слое 0–200 м — 0–91 мкг N/л. Зимний максимум аммонийного азота, как и фосфатов, наблюдали в феврале.

В слое 0–200 м средневзвешенная величина его содержания (32 мкг N/л) была на порядок выше этого показателя в январе (3 мкг N/л) (табл. 1). В марте и апреле аммонийный азот в озере, в основном, отсутствовал. Поступление аммония с паводковыми водами обусловило образование весеннего максимума аммония в конце мая (83 мкг N/л). Снижение содержания аммонийного азота в период с середины июня до середины июля, происходившее на фоне увеличения количества осадков и поступления аммония с поверхностным стоком в паводок, было обусловлено, вероятно, его потреблением фитопланктоном, достигшим в это время пика своего развития. Летний максимум концентрации аммонийного азота (42 мкг N/л) в конце июля, когда активность фото-

синтетических процессов начала снижаться, образовался, возможно, за счёт экскреции аммония как зоопланктоном, так и молодой нерки и зашедшими производителями. С конца июля до начала сентября, с дальнейшим ослаблением вегетационных процессов, содержание аммония сохранялось примерно на одном уровне за счёт минерализации накопившегося в воде автохтонного органического вещества, в том числе и азотосодержащих соединений. Вслед за осенним минимумом (21 мкг N/л) количество аммонийного азота в середине октября увеличилось до годового максимума (91 мкг N/л), совпавшего с осенним максимумом фосфатов. Росту количества биогенов в этот период способствовали, в основном, разложение отнерестовавших производителей нерки, а также значительное количество осадков и снижение активности процессов фотосинтеза в водоёме. В конце года содержание аммония снизилось до 15–22 мкг N/л. В слое 0–40 м сезонная динамика аммонийного азота незначительно отличалась от его динамики в слое 0–200 м: от зимы к весне характер изменений был аналогичным, летний и осенний максимумы отмечены в конце июля и в середине октября (табл. 1). Вертикальное распределение аммония обусловлено как динамикой водных масс, так и распределением гидробионтов в толще воды, и в течение года не обнаруживало выраженной закономерности.

Межгодовая изменчивость содержания аммония за вегетационный период как в слое 0–40 м, так и в слое 0–200 м весьма вариабельна (рис. 6) и определяется, в основном, количеством зашедших на нерест производителей нерки.

Низкое содержание аммония, характерное для 1997 и 1998 гг., объясняется минимальными заходами

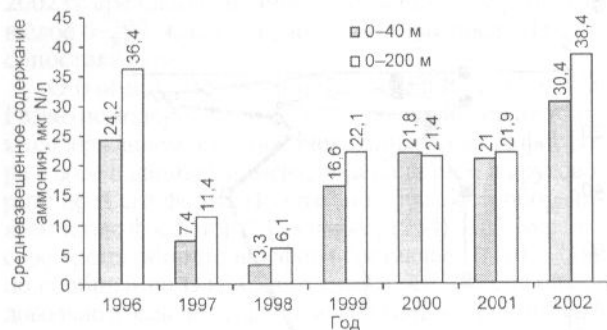


Рис. 6. Межгодовая изменчивость средневзвешенного содержания аммония в вегетационный период

нерки (0,65 млн экз. в 1997 г. и 0,62 млн экз. в 1998 г.). Сопоставление содержания общего фосфора (поступающего с производителями нерки) и средневзвешенного количества аммония за вегетационный сезон показало наличие связи между фосфором (поступающим с производителями) и содержанием аммония в водоёме, описываемой логарифмической зависимостью (для слоя 0–40 м $R^2=0,843$, а для слоя 0–200 м $R^2=0,806$), т. е. межгодовую изменчивость содержания фосфора и аммония определяет, в основном, один источник — биомасса отнерствовавших рыб.

Н и т р и т ы. Нитриты, являясь нестойким промежуточным продуктом окислительно-восстановительных процессов в водоёмах, присутствовали в оз. Курильское, в основном, в небольших количествах (0–18 мкг N/л). Средневзвешенные величины их содержания не превышали 11 мкг N/л. В слое 0–40 м содержание нитритов было наибольшим в феврале, середине сентября и в ноябре (табл. 1). В слое 0–200 м концентрация увеличивалась с января по март. С апреля по июль его количество не превышало 3 мкг N/л, далее следовало постепенное увеличение их содержания до годового максимума величин в середине ноября — 11 мкг N/л (табл. 1). Появление нитритов в повышенных концентрациях обычно указывает на усиленное разложение органических остатков в водоёме, и увеличение их содержания в ноябре могло быть обусловлено максимальным развитием зоопланктона и разложением снетки, так как нитриты представляют собой промежуточную ступень в цепи бактериальных процессов окисления аммония до нитратов в аэробных условиях. В декабре нитриты практически отсутствовали. В вертикальном распределении нитритов закономерностей не выявлено.

Межгодовая динамика нитритного азота в слое 0–200 м характеризовалась следовыми величинами по 2000 г., наибольшим содержанием в 2001 г. и снижением в 2002 г. (рис. 7). В слое 0–40 м в 2002 г. этот показатель составил максимальную величину — 5 мкг N/л за рассматриваемый ряд лет.

Н и т р а т ы. Для данного водоёма характерно постоянное преобладание нитратов над остальными формами азота (табл. 1), что указывает на значительное поступление с поверхностным стоком, а также является следствием нитрификационных процессов и недостаточного потребления фитопланктоном из-за несбалансированности соотношения N:P. Такое состояние характерно для олиготрофных озёр, не под-

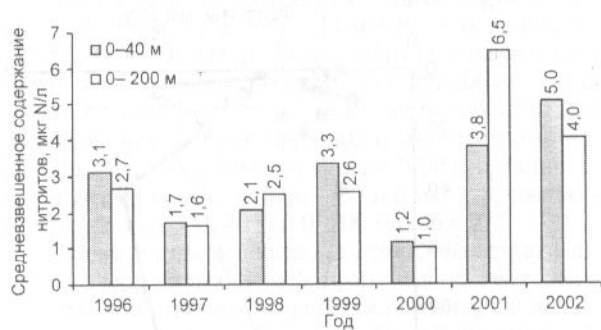


Рис. 7. Межгодовая динамика средневзвешенного содержания нитритов в вегетационный сезон

вергающихся антропогенному эвтрофированию (Finflay et al., 1999). В течение года содержание нитратного азота варьировало от 68 до 287 мкг N/л. Средневзвешенные величины его содержания изменялись в диапазоне 82–218 мкг N/л. В слоях 0–40 м и 0–200 м динамика нитратов была сходной. Минимумы и максимумы величин их содержания совпадали по времени, значения средневзвешенных величин их концентраций отличались незначительно. В вертикальном распределении нитратов закономерностей также не выявлено.

В межгодовой динамике нитратов отмечался рост величин их содержания от 1997 к 2000 г. и плавный спад до 137 мкг N/л в 2002 г. (рис. 8). Межгодовая динамика средневзвешенного содержания нитратов в слое 0–200 м и в 0–40 м была идентичной.

Суммарное содержание форм минерального азота. Суммарное содержание форм минерального азота, в основном, определялось содержанием нитратов, как доминирующей формы минерального азота. В слоях 0–40 м и 0–200 м изменения концентрации имели, в целом, синхронный характер. Снижение суммы минерального азота в слое 0–40 м в конце мая было обусловлено весенним цветением фитопланктона. Содержание минеральных форм азота в оз. Курильское в слое 0–200 м составляло от 82 до 214 мкг N/л. Сезонные минимумы его концентрации отмечены в марте, июле, октябре и ноябре, максимумы — в мае, сентябре и декабре. Характерная черта внутригодовой динамики суммарного минерального азота — постепенное увеличение содержания от начала к концу года (рис. 9).

Соотношение форм минерального азота. Важным фактором, регулирующим видовой состав фитопланктона в водоёме, является со-

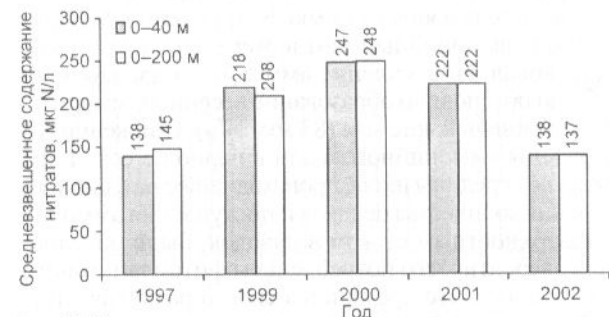


Рис. 8. Межгодовая динамика содержания нитратов в вегетационный сезон

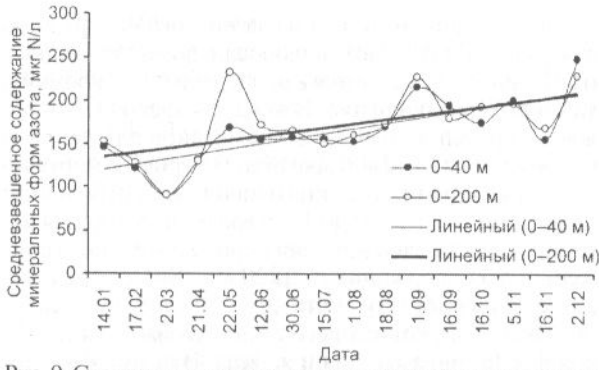


Рис. 9. Сезонная динамика средневзвешенного содержания суммарного минерального азота в 2002 г.

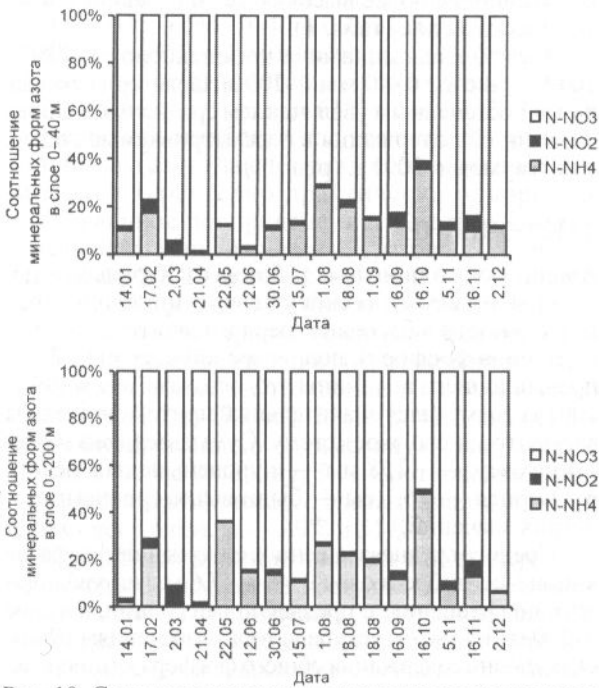


Рис. 10. Сезонная динамика соотношения минеральных форм азота в 2002 г.

отношение форм минерального азота (рис. 10). Избирательное потребление форм азота фитопланктоном может изменять их соотношение в воде (Thomas, 1953). Содержание нитратов в водоёме сохранялось постоянно высоким в течение года, составляя до 97% всего минерального азота, что объясняется, в основном, значительным поступлением нитратов со стоком, образованием их в водной толще водоёма в процессе нитрификации и недостаточной их ассимиляцией фитопланктоном в связи с дефицитом фосфатов. Содержание аммония наиболее высокое в октябре (36% в слое 0–40 м и 47% в слое 0–200 м), когда идёт процесс разложения снётки.

Содержание общего органического азота. Градиенты концентрации для всех форм азота в исследуемом слое 0–200 м наиболее были выражены в середине июля 2002 г. и составили: 92 мкг N/л для минерального азота (127–219 мкг N/л), 338 мкг N/л для органического азота (59–397 мкг N/л) и 361 мкг N/л для общего азота (212–573 мкг N/л) (табл. 3). В июле в верхнем 5-метровом слое, во время активной вегетации фитопланктона, преобладал органический азот. К сентябрю вертикальное распределение форм азота становилось более выровненным и градиенты концентрации значительно уменьшились — 57 мкг N/л для минерального азота (195–252 мкг N/л), 83 мкг N/л — для органического азота (172–255 мкг N/л) и 71 мкг N/л — для общего азота (407–478 мкг N/л). В сентябре, когда производство органического вещества пошло на спад, потребление минерального азота снизилось, а поступление последнего со стоком и в результате рециклинга азотосодержащих соединений продолжалось, содержание минерального и органического азота стало сопоставимым (табл. 3).

Средневзвешенные величины содержания различных форм азота в 2002 г. в слоях 0–200 и 0–40 м отличались незначительно (табл. 4). Отношение общего азота (TN) к минеральному ($N_{мин.}$) было на уровне 2000 г. Отношение $TN:N_{мин.}$ в слоях 0–40 м и 0–200 м составляло, соответственно, 2 и 3.

Отношение минерального азота к минеральному фосфору. Кроме абсолютных величин содержания биогенных элементов в

Таблица 3. Вертикальное распределение форм азота в 2002 г.

Глубина, м	15.07.02					01.09.02				
	$N_{мин.}$, мкг N/л	$N_{мин.}$, %	$N_{орг.}$, мкг N/л	$N_{орг.}$, %	TN, мкг N/л	$N_{мин.}$, мкг N/л	$N_{мин.}$, %	$N_{орг.}$, мкг N/л	$N_{орг.}$, %	TN, мкг N/л
0	150	41	215	59	365	235	58	172	42	407
2	144	43	195	57	339	226	47	250	53	476
5	165	42	230	58	395	213	50	211	50	424
7	127	58	94	42	221	218	48	236	52	454
10	153	72	59	28	212	224	47	250	53	474
15	175	52	164	48	339	223	47	255	53	478
20	135	63	78	37	213	195	44	253	56	448
40	176	31	397	69	573	239	52	225	48	464
70						243	52	222	48	465
100	144	39	225	61	369	252	54	212	46	464
150	136	37	217	63	369	218	48	240	52	458
200	219	62	246	38	352	219	47	246	53	465

Примечание. $N_{мин.}$ — минеральный азот; $N_{орг.}$ — органический азот; TN — общий азот (валовый)

Таблица 4. Средневзвешенные величины содержания форм азота (мкг N/л) в оз. Курильское в 2000 и 2002 гг.

Дата	Слой, м	TN	N _{мин.}	N _{орг.}	TN:N _{мин.}
19.09.00	0–40	740	378	362	2
	0–200	654	413	241	2
15.07.02	0–40	342	154	188	2
	0–200	392	158	244	3
01.09.02	0–40	458	218	240	2
	0–200	462	230	231	2

Условные обозначения: TN — общий азот (валовый); N_{мин.} — минеральный азот; N_{орг.} — органический азот

воде большое значение для экосистемы водоёма имеет величина их соотношения. Для фитопланктона наиболее благоприятным является соотношение N:P в весовом соотношении равное 7:1, близкое к такому в клетках водорослей и способствующее наиболее полному усвоению этих компонентов фитопланктоном (Golterman, 1969; Thomas, 1955). Опытным путём установлено, что нарушение этого равновесия в сторону уменьшения азота обуславливает развитие синезелёных водорослей (Schindler, 1977). В оз. Курильское, где основным биогенным элементом, определяющим продуктивность первого трофического уровня, является фосфор, отношение N_{мин.}:P_{мин.} в слоях 0–40 м и 0–200 м значительно превышало оптимальную величину (табл. 5).

Ж е л е з о. Основным недостатком мониторинга содержания железа в оз. Курильское из-за отсутствия феррозина, является определение его персульфатным методом с использованием в качестве индикатора роданида калия по О.А. Алёкину (Алекин и др., 1973), в результате нижний порог определения этого ингредиента составляет 50 мкг Fe/л. Поэтому при анализе опущены значения ниже данной пороговой величины. Средневзвешенные величины содержания железа (Fe(II) и Fe(III)) в слоях 0–40 м и 0–200 м только в мае были выше предела разрешимости метода и составили 54 мкг Fe/л, а в слое 0–40 м содержание железа в ноябре характеризовалось величиной 52 мкг Fe/л (табл. 1).

Ранее сделанная оценка содержания железа показала (устное сообщение Сапожникова), что оно не относится к числу биогенов, лимитирующих развитие фитопланктона. Высокое содержание железа в озёрной воде обусловлено прежде всего характером подстилающих извержённых пород, содержащих железо.

К р е м н и й. В 2002 г. средневзвешенное содержание кремния в оз. Курильское варьировало в диапазоне от 986 до 2289 мкг Si/л (табл. 1). Высокое содержание кремния в толще воды в течение года обеспечивается поступлением его с поверхностным стоком, подстилающими породами, содержащими алюмосиликаты, и ограниченным потреблением диато-

Таблица 5. Соотношение минеральных форм азота и фосфора (N_{мин.}:P_{мин.}) в оз. Курильское в 2002 г.

Слой, м	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0–40	47	11	—	23	31	30	—	23	38	17	17	—
0–200	45	12	21	26	46	30	49	25	57	21	18	59

мовым фитопланктоном из-за низкого содержания фосфатов. Диатомовые водоросли, доминирующие в оз. Курильское, являются как потребителем кремния, так и его продуцентом. В январе и феврале содержание кремния обычно максимальное для данного водоёма — 2000–2400 мкг Si/л. В период с марта по май концентрация кремния изменялась в небольшом диапазоне — от 1670 до 1810 мкг Si/л. Активная вегетация водорослей в летний период обусловила снижение его содержания от 1220 мкг Si/л с середины июня до годового минимума в середине июля (879 мкг Si/л), совпавшего с минимумами содержания фосфатов, аммония и железа. В осенне-зимний период количество кремния варьировало в небольшом интервале — 1350–1800 мкг Si/л. В слоях 0–40 и 0–200 м сезонная динамика кремнекислоты была идентичной, с более высоким её содержанием в эвфотическом слое (табл. 1).

Межгодовая динамика кремнекислоты (1996–2002 гг.) в слое 0–40 м и 0–200 м характеризовалась почти постепенным увеличением средневзвешенных величин её содержания в рассматриваемые годы с максимумом в 2001 г. (рис. 11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ мониторинговых работ на оз. Курильское показал, что в 2002 г. за счёт усиления циклонической деятельности в бассейне озера и значительного поступления фосфора с половозрелой неркой (8,71 т), превышавшего величины этого показателя в 1991–2001 гг., отмечался значительный приток биогенных элементов в его экосистему. Сумма осадков в бассейне озера — 1158 мм — и уровень воды в истоке р. Озерная — 76,1 см — были выше среднегого-летних значений.

Среднее средневзвешенное содержание фосфатов в июне–сентябре в слое 0–40 м (7,6 мкг/л) увеличилось по сравнению с предыдущими годами, а в слое 0–200 м (7,4 мкг/л) уступало только значениям 1998 г. Отношение содержания общего фосфора к минеральному колебалось в диапазоне 2–3. Вертикальное распределение общего и органического фосфора имело идентичный характер.

Среднегодовое содержание аммонийного азота зависит, в основном, от биомассы отнерестившихся рыб. Среднее средневзвешенное содержание аммонийного

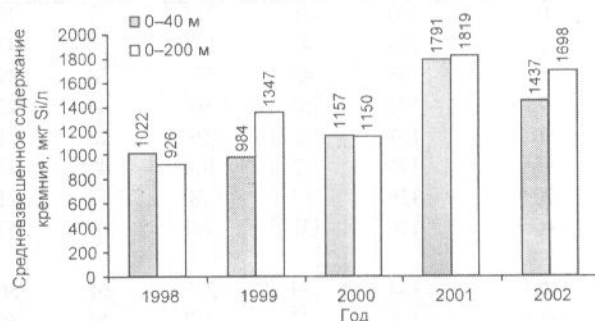


Рис. 11. Межгодовая динамика средневзвешенного содержания кремния в вегетационный сезон в слоях 0–40 м и 0–200 м

азота в вегетационный сезон 2002 г. (30,4 мкг/л в слое 0–40 м и 38,4 мкг/л в слое 0–200 м) превысило значения предыдущего ряда лет (1996–2001 гг.). Аналогичный показатель для нитритов в этот период в слое 0–40 м (5 мкг/л) характеризовался наиболее высокими значениями для данного водоёма, начиная с 1996 г., а в слое 0–200 м (4 мкг/л) уступал только значениям 2001 г.

Основной запас азота в озере создаётся за счёт нитратов. Их содержание в водоёме сохранялось постоянно высоким в течение 2002 г., составляя до 97% всего минерального азота, что объясняется, в основном, значительным поступлением нитратов со стоком, образованием их в водной толще водоёма в процессе нитрификации и недостаточной ассимиляцией фитопланктоном в связи с дефицитом фосфатов. Относительное количество этого биогенного вещества в 2002 г. в слое 0–40 м составляло 82%, а в слое 0–200 м — 84% от суммы минеральных форм азота. Минимальное относительное содержание нитратов (50% в слое 0–40 м и 61% в слое 0–200 м) характерно для октября, когда увеличилась доля аммонийного азота за счёт разложения снёнки. Для нитратов характерно практически однородное вертикальное распределение. Средние средневзвешенные концентрации нитратов в вегетационный сезон 2002 г. в слоях 0–40 м и 0–200 м идентичны (138 мкг/л и 137 мкг/л, соответственно).

В 2002 г. в оз. Курильское сохранилась несбалансированность соотношения N:P, отмечаемая в предшествующие годы. Отношение $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}}$ в слоях 0–40 м (от 11:1 до 47:1) и 0–200 м (от 12:1 до 59:1) значительно превышало оптимальную для развития фитопланктона величину (7:1). Соотношение минерального и органического азота в анализируемых слоях очень близкое — 49% и 51%.

Высокое содержание кремния в воде озера в течение года обеспечивается поступлением его с поверхностным стоком, растворением тонкопанцирных оболочек диатомовых, выщелачиванием из подстилающих пород, содержащих алюмосиликаты, и ограниченным потреблением диатомовым фитопланктоном из-за низкого содержания фосфатов. Сезонная концентрация кремнекислоты зависит от уровня развития диатомовых: максимум характерен для зимнего периода, минимум наблюдается в июне–июле. Среднее средневзвешенное содержание кремния в вегетационный сезон в слое 0–40 м (1437 мкг/л) и в слое 0–200 м (1698 мкг/л) уступало только значениям 2001 г., превышая показатели предыдущих лет.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны сотрудникам Озерновского наблюдательного пункта за сбор и доставку проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алекин О.А., Семёнов А.Д., Скопинцев Б.А. 1973. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 286 с.

Кизеветтер И.В. 1948. Об изменениях химического состава тела красной (нерки) // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Т. 28. С. 29–42.

Крохин Е.М. 1957. Источники обогащения нерестовых озёр биогенными элементами // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Т. 45. С. 29–35.

Крохин Е.М. 1958. Колебания кормности оз. Курильского в связи с изменением численности красной, нерестующей в озере // Технич.-эконом. бюлл. Камч. совнархоза. № 6. 28 с.

Крохин Е.М. 1959. О влиянии количества отнерестовавших в озере производителей красной на режим биогенных элементов // Докл. АН СССР. Т. 128. № 3. С. 626–627.

Крохин Е.М. 1967. Влияние размеров пропуска производителей красной на фосфатный режим нерестовых озёр // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Т. 57. С. 31–54.

Крохин Е.М., Крогуис Ф.В. 1937. Очерк бассейна р. Большой и нерестилищ лососевых, расположенных в нём // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Т. 9. 156 с.

Максимова М.П. 1964. Расчёты скоростей регенерации азота и фосфора в водах Индийского океана // Океанология. Т. 12. Вып. 6. С. 1003–1010.

Миловская Л.В. 2002. Характеристика гидрометеорологических условий и поступления фосфора в Курильское озеро в 1980–2000 гг. Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана // Сб. науч. тр. Камчат. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Вып. 6. С. 19–26.

Парсонс Т.Р., Тахакаши М., Харгрейв Б. 1982. Биологическая океанография. М.: Лег. и пищ. пром-сть. С. 93–94.

Пономарёв В.П., Кононенко Л.А., Седин В.Н., Маслов А.В. 1986. Внутригодовой сток реки Озерной и колебания уровня оз. Курильского // Комплексные исследования озера Курильского (Южная Камчатка). Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. ун-та. С. 184–198.

Сапожников В.В., Аржанова Н.В., Михайловский Ю.А., Уколова Т.К., Свириденко В.Д. 2002. Гидрохимические особенности озера Курильского // Водные ресурсы. Т. 29. № 4. С. 468–475.

Синяков С.А. 1993. Круговорот фосфора и параметры экосистемы Курильского озера при оптимальном заполнении нерестилищ. Исследования биологии и динамики численности промысловых рыб Камчатского шельфа // Сб. науч. тр. Камчат. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Вып. 2. С. 50–61.

Справочник гидрохимика: Рыбное хозяйство. 1991. (Под ред. В.В. Сапожникова). М.: Агропромиздат, 224 с.

Степанов В.В. 1986. Химический состав вод озера Курильского // Комплексные исследования озера Курильского (Южная Камчатка). Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. ун-та. С. 134–142.

Уколова Т.К., Свириденко В.Д. 2002. Межгодовая динамика кислорода и биогенов в оз. Курильское в 1980–2000 гг. Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана // Сб. науч. тр. Камчат. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Вып. 6. С. 7–18.

Golterman H.L. 1969. Methods for chemical analysis of fresh waters // IBP. № 8. Oxford-Edinburg, 171 p.

Finflay D.L., Hecky R.E., Kasian S.E.M., Stainton M.P., Hendzel L.L., Schindler E.U. 1999. Effects on phytoplankton of nutrients added in conjunction with acidification // *Freshwater Biol.* V. 41. № 1. P. 131–145.

Juday C., W.H. Rich, G.I. Kemmerer and A. Mann. 1932. Limnological studies of Karluk Lake, Alaska, 1926–1930 // *Fish. Bull.* V. 47. P. 407–436.

Ricker W.E. 1937. Physical and chemical characteristics of Cultus Lake, British Columbia // *J. Biol. Boad Can.* V. 3. P. 363–402.

Schindler D.W. 1977. Whole-lake eutrophication experiments with phosphorus nitrogen and carbon // *Intern. Verein. Limnology.* V. 19. № 4. P. 322–323.

Thomas E.A. 1953. Zur Bekämpfung der See-Eutrophierung: empirische und experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Minimumstoffe in 46 Seen der Schweiz und Angrenzender Gebiete // *Monatsbull. Schweiz. Vereins von Gas und Wasserfachmannern.* V. 33. № 2. P. 25–32.

Thomas E.A. 1955. Stoffharshalt und Sedimentation in oligotrophen Aegerisee und in eutrophen Pfälliker und Greifensee // *Mem Inst. Ital. Hidrobiol. Suppl.* № 8.