

УДК 639.312:631.8

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОЗ. КУРИЛЬСКОМ В 2005 Г.

Т. К. Уколова, В. Д. Свириденко



Ст. н. с., инженер, Камчатский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
683000 Петропавловск-Камчатский, Набережная, 18
Тел., факс: (415-2) 41-27-01; 42-49-92
E-mail: UkolovaT@kamniro.ru, Sviridenko@kamniro.ru

Дана характеристика сезонной динамики и вертикального распределения общих, минеральных и органических форм фосфора и азота, минеральных форм железа и кремния, и атомные соотношения биогенных элементов (Si:N:P) в воде оз. Курильское. Поступление фосфора в озеро с рыбой в 2005 г. было ниже средней величины за период с 1980 по 2005 гг. Низкое содержание фосфатов в воде ограничивало утилизацию других биогенных элементов. Минеральный азот в воде был представлен, в основном, нитратами. Величины атомных соотношений минеральных форм кремния и азота к фосфатам (Si:N:P) в воде озера значительно превышали оптимальные значения, близкие к таковым в клетках водорослей. Доля органического азота в воде была значительно выше, чем минерального.

THE SEASONAL DYNAMICS OF THE BIOGENIC ELEMENTS IN THE LAKE KURILSKOYE IN 2005

T. K. Ukolova, V. D. Sviridenko

Senior scientist, engineer, Kamchatka Research Institute of Fisheries and Oceanography
683000 Petropavlovsk-Kamchatsky, Naberejnaya, 18
Tel., fax: (415-2) 41-27-01; 42-49-92
E-mail: UkolovaT@kamniro.ru, Sviridenko@kamniro.ru

The description of the seasonal dynamics and vertical distribution of general, mineral and organic phosphorous and nitrogen, mineral iron and silicon and the atomic ratio between the biogenic elements (Si:N:P) in the water of the lake Kurilskoye has been provided. The input of phosphorous to the lake with fish carcasses in 2005 was lower than the average input for the period from 1980 to 2005. The lowest concentration of phosphates in the water was limiting for utilization of the other biogenic elements. Mineral nitrogen dissolved in the water was represented mainly by nitrates. The amounts of the atomic ratio between mineral silicon and nitrogen and phosphates (Si:N:P) in the water of the lake exceeded the optimum similar to the amount in the algae cells. The amount of organic nitrogen in the water was substantially higher than the amount of mineral nitrogen.

Озеро Курильское является нерестово-выростным водоемом самого крупного азиатского стада нерки. Основой биопродуктивности водоемов являются биогенные вещества, которые опосредованно, через начальные звенья трофической цепи, оказывают воздействие на кормовую базу молоди лососей, их размерно-весовые показатели и, в конечном счете, на выживаемость рыб в водоеме и их возвраты на нерест (Milovskaya et al., 1998; Миловская, Дубынин, 1999).

Первые наблюдения за гидрохимическим режимом оз. Курильское были проведены в 1932–1933 гг. (Крохин, Крогиус, 1937), в 1975 г. продолжены Е.Б. Павельевой и Ю.В. Ларионовым (1979), а с 1979 г. установлен постоянный гидрохимический мониторинг экосистемы водоема (Уколова, 1988; Уколова, Свириденко, 2002, 2004). В период с 1980 по 1983 гг. в исследованиях принимали участие (на хозяйственных условиях) сотрудники ДВГУ (Комплексные исследования..., 1986). В 1990 и 1998 гг. в планктоне проводили определение

хлорофиллов, феофитина и каротина (Лепская и др., 2000; Milovskaya et al., 1998). Результаты определения органического углерода показали, что его количество в озерной воде, в основном, не превышает 3 мг/л (Лепская и др., 2005; Калинина, 2004).

Формирование гидрохимического режима водоема происходит под воздействием поверхностного и грунтового стоков, атмосферных осадков, внутриводоемных процессов, в частности, рециклинга биогенных элементов, а также поступления питательных веществ, в основном фосфора, с нерестовавшими производителями. Последний фактор является наиболее изменчивым (Миловская, 2002, 2004). Содержание биогенных элементов в воде зависит также от их потребления фитопланктоном, выноса из озера с химическим и биологическим стоками р. Озерная и от интенсивности процессов седиментации. Вертикальное распределение и сезонная динамика биогенных элементов в озере в значительной степени определяются внутриводоемными процессами, в частности, ин-

тенсивностью вегетационных процессов, динамикой вод, поступлением со стоком и метеоусловиями года (Синяков, 1993; Сапожников и др., 2002). На межгодовые изменения гидрохимических показателей, кроме вышеперечисленных факторов, оказывают воздействие тепловой режим озера, период водообмена, а также приток фосфора и азота со снеткой (трупам отнерестовавших производителей).

Результаты предшествующих работ показали, что в оз. Курильское лимитирующим биогенным элементом является фосфор, что подтверждается высокими величинами соотношений азота и фосфора, значительно превышающими оптимальное значение, близкое к их соотношению в клетках водорослей (Уколова, 2002; Сапожников и др., 2002).

Содержание отдельных биогенных веществ в притоках, питающих озеро, значительно выше, чем в озерной воде (Крохин, Крогиус, 1937; Степанов, 1986; Захаров, 2002).

В результате совместных работ авторов с сотрудниками ВНИРО в 2000 и 2001 гг. были проведены исследования химического состава озерной и речных вод. Получены данные по общим и органическим формам азота и фосфора, растворенному и взвешенному органическому углероду, основным биохимическим компонентам растворённого и взвешенного органического вещества (углеводы, белок и липиды), фотосинтетическим пигментам. По активности гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов были определены скорости деструкции органического вещества и рециклинга фосфора в толще воды. Показано, что дефицит фосфатов в воде частично компенсируется его регенерацией (Сапожников и др., 2002).

Задача настоящей работы — дать характеристику биогенного режима озера в 2005 г.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом для настоящей работы послужили результаты обработки гидрохимических проб воды, взятых на центральной станции озера № 2 в 2005 г. (рис. 1).

В период с апреля по октябрь отобрано и проанализировано на содержание фосфатов, аммония, нитритов, нитратов, железа и кремния 156 проб озёрной воды; общий азот и фосфор (в 60 пробах) определяли в период с апреля по июль. Органические формы фосфора и азота рассчитывали по разности между содержанием общих и минеральных форм.

Анализ воды на содержание минеральных форм биогенных элементов проводили в соответствии с «Руководством...» (Алекин, 1973), общих форм азота и фосфора — сжиганием с окислитель-



Рис. 1. Карта-схема Курильского озера

ным реактивом по методике Вальдеррама и Королеффа (Справочник гидрохимика, 1991). Чувствительность применяемых методов для фосфатов составляет 3 мкг/л, железа — 50 мкг/л. Колориметрирование проб проводили на фотоэлектрическом фотометре КФК-3.

Сезонную динамику биогенных элементов анализировали по средневзвешенным значениям для слоёв: 0–15 м — слоя активного фотосинтеза (Лепская, Маслов, 2006), и слоя 0–200 м (зоны обитания ракообразных) (Носова, 1968). Для расчета поступления фосфора (в форме P_2O_5) с производителями нерки содержание биогенных элементов в теле рыб принимали равным 0,28% от их массы (Кизеветтер, 1948).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика биогенного режима оз. Курильское

Фосфор. Запасы биодоступного фосфора в водоеме зависят от его поступления в водную толщу с поверхностным и грунтовым стоками, с атмосферными осадками и в процессе минерализации отнерестовавших производителей нерки и органического вещества планктона (отмирающие организмы и продукты их жизнедеятельности), и потерь за счет его потребления фитопланктоном, выноса со стоком, химического и биологического осаждения.

Поступление фосфора с отнерестовавшими производителями нерки. В 2005 г. поступление фосфора от минерализации отнерестовавших производителей нерки составило 4,67 т Р (рис. 2), что ниже средней величины (6,27 т Р) за период с 1980 по 2005 гг. Приток фосфора за счет ежегодного поступления с рыбой в озеро очень мал, но, вследствие замедленного водообмена озера (Пономарев и др., 1986), поступающий с рыбой и со стоком фосфор аккумулируется в водоёме (Миловская, 2002) и, благодаря рециклингу (Синяков, 1993; Сапожников и др., 2002), длительное время находится в обороте.

По данным Л.В. Миловской, суммарный приток фосфора в озеро с рыбой (в 1980-х годах и с удобрениями) был наиболее высоким в период с 1980 по 1990 гг. В 2000 г. суммарное поступление фосфора, участвующего в круговороте за предыдущие 16 лет (Миловская, 2000, 2002), составило 132 т, что значительно превышает уровень дофертилизационного периода (1970-е годы) (31–51 т). Запас аккумулированного фосфора в экосистеме озера постепенно снижается — от 132 т в 2000 г. до 94 т в 2005 г., но по-прежнему остаётся высоким относительно среднегодовой величины данного показателя (89 т) для периода 1940–2005 гг.

Минеральный фосфор. Для оз. Курильское характерно низкое содержание фосфатов, обусловленное, в основном, их потреблением фитопланктоном и осаждением его в донные осадки в составе фитопланктона, а также в виде солей железа и алюминия.

В 2005 г. наибольшее их количество в озёрной воде наблюдали в апреле (14–16 мкг Р/л) (рис. 3, табл. 1). Летний максимум минерального фосфора отмечали в пик половодья. В 2005 г. увеличение уровня воды в р. Озерная наблюдалось с мая по июль, после чего равномерный спад воды про-

должался до сентября, осенняя межень отмечена в октябре (рис. 3).

Наличие достоверной корреляционной связи между фосфатами и уровнем воды в р. Озерная (в период с мая по сентябрь коэффициент корреляции между этими величинами (r) составил 0,58, при $n = 11$, $p < 0,01$) подтверждает роль поверхностного стока в формировании биогенного, и в частности фосфатного, режима озера.

Весенний минимум фосфатов в слоях 0–15 и 0–200 м наблюдали в мае, в начальный период активной вегетации водорослей. С третьей декады июля по середину октября содержание фосфатов было низким: средневзвешенные величины в слое 0–15 м составляли от «следов» до 4 мкг/л с минимумом в июле и середине октября. В слое 0–200 м динамика фосфатов была аналогичной. Быстрая регенерация фосфора из органических соединений, вследствие высокой активности ферментов щелочной фосфатазы (время оборота фосфора составляет 8–10 час.) (Сапожников и др., 2002), обеспечивает развитие диатомового планктона, но не полностью компенсирует недостаток фосфатов, что приводит к недоиспользованию азота и кремния в толще воды (Гутельмахер, 1982; Сапожников и др., 2002). Поступление минерального фосфора в результате разложения тел отнерестовавших производителей в октябре, вероятно, было ещё незначительным ввиду начальной стадии этого процесса, так как пик нереста нерки в озере обычно приходится на конец сентября – начало октября (Егорова, 1967; Селифонов, 1975). Если время минерализации мышечной ткани снетки составляет около 2 месяцев (Сапожников и др., 2002), то основной приток фосфатов от ее разложения придётся, примерно, на ноябрь–декабрь. В апреле–октябре 2005 г. вертикальное распределение фосфатов было сравнительно однородным, за исключением июля (рис. 4). Минимальное содержание фосфатов наблюдали в на-



Рис. 2. Межгодовая изменчивость поступления фосфора с производителями нерки (т) в оз. Курильское в 1980–2005 гг.

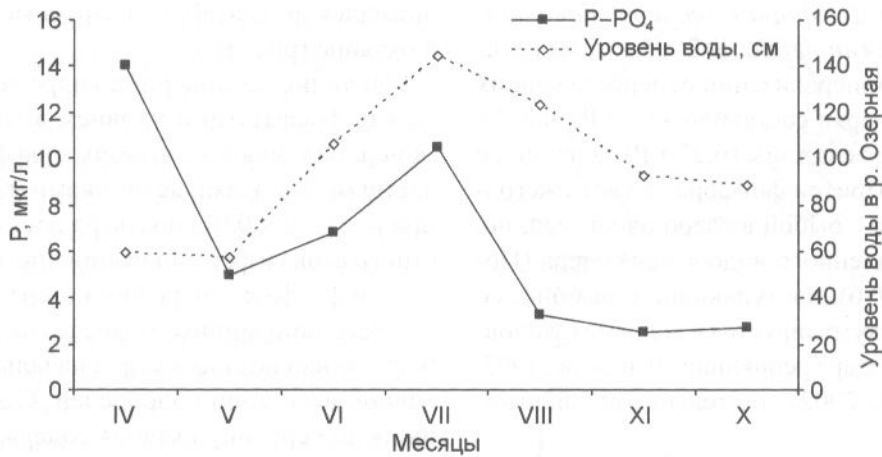


Рис. 3. Сезонная динамика концентрации фосфатов в воде озера (0–200 м) и уровня воды в р. Озерная в 2005 г.

чале июля в подповерхностном слое озера (3 мкг/л на глубине 5 м), на остальных горизонтах их концентрация изменялась в пределах 6–12 мкг/л. В середине июля (пик половодья) наибольшая концентрация (21 мкг/л) отмечена на глубинах 7 и 150 м, минимум — на глубине 200 м (9 мкг/л). В конце июля содержание фосфатов резко снизилось: в слое 0–20 м оно составляло 0–5 мкг/л, в слое 40–150 м — 3–8 мкг/л, а наибольшее содержание (12 мкг/л) отмечали на глубине 200 м.

Общий и органический фосфор. Основными источниками поступления общего фосфора в озеро являются речной сток (Драчёв и др., 1976) и минерализация снетки. В 2005 г. его содержание в озере в слое 0–15 м снизилось с апреля до середины мая с 30 до 20 мкг/л (весенний минимум) (табл. 2). Увеличение его количества в июле, как и минерального фосфора, происходило параллельно с подъемом уровня воды в р. Озерная. После прохождения паводка содержание валового фосфора в воде в кон-

це июля понизилось до минимума (11 мкг/л). Аналогичная динамика общего фосфора отмечена и в слое 0–200 м.

Изучение некоторых больших озер Британской Колумбии показало, что олиго-мезотрофный уровень продуктивности со средней величиной общего фосфора (TP) в 10–40 мг/м³ (или 10–40 мкг/л) обеспечивают гораздо большую продукцию лососей, чем при его содержании ниже 10 мг/м³ (Northcote, 1973; Stockner, 1987; Ashley et al., 1997). Ограниченное число проб, характеризующих содержание общего фосфора в слое 0–200 м, не позволило детально охарактеризовать сезонную изменчивость его содержания в 2005 г., но имеющиеся данные с апреля по июль показывают диапазон концентраций TP в 14–34 мкг/л, что, теоретически, поддерживало высокий уровень потенциальной рыбопродуктивности водоема.

Сезонная динамика органического фосфора в слое 0–15 м характеризовалась сравнительно од-

Таблица 1. Сезонная динамика содержания биогенных элементов в оз. Курильское (мкг/л, Si в мг/л) в слоях 0–15 и 0–200 м в 2005 г.

Дата	0–15 м						0–200 м					
	P-PO ₄	N-NH ₄	N-NO ₂	N-NO ₃	Fe	Si	P-PO ₄	N-NH ₄	N-NO ₂	N-NO ₃	Fe	Si
07.04	15	22	2	150	66	1,9	15	24	2	98	53	1,6
26.04	16	58	2	190	<50	1,5	13	58	2	204	<50	1,6
13.05	<3	22	1	220	<50	1,1	5	16	1	233	<50	1,0
26.05	6	24	20	240	56	0,9	5	26	7	246	57	0,9
11.06	5	16	1	240	<50	0,7	5	21	1	249	<50	0,7
27.06	9	149	0	240	<50	0,7	9	59	1	279	52	0,7
01.07	8	18	0	220	<50	0,7	11	16	0	227	<50	0,7
14.07	15	37	4	230	83	0,6	15	32	4	246	80	0,6
23.07	<3	0	1	290	68	0,6	6	42	0	416	64	0,5
24.08	3	37	4	180	102	0,9	3	64	2	175	105	0,67
11.09	4	17	6	320	<50	0,8	<3	52	4	331	<50	0,7
30.09	3	174	2	290	<50	0,5	3	122	2	283	<50	0,5
15.10	<3	22	2	310	<50	0,5	3	24	2	312	<50	0,5

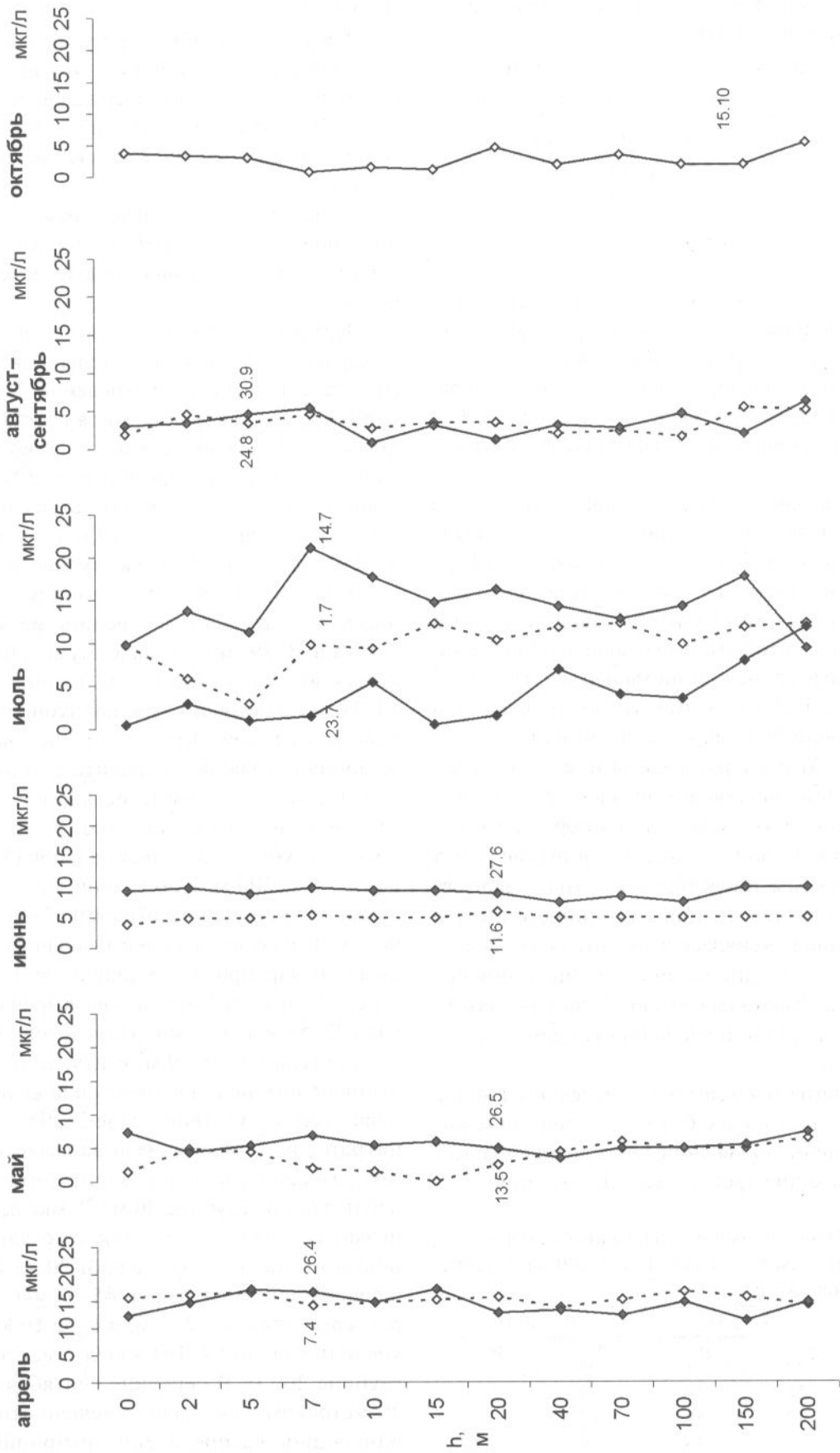


Рис. 4. Вертикальное распределение содержания фосфатов в 2005 г.

Таблица 2. Сезонная динамика содержания форм фосфора (мкг Р/л) в оз. Курильское в слоях 0–15 и 0–200 м в апреле, мае и июле 2005 г.

Дата	0–15 м			0–200 м		
	ТР	Р _{мин.}	Р _{орг.}	ТР	Р _{мин.}	Р _{орг.}
07.04	30	15	15	29	14	15
13.05	20	2	18	18	5	13
01.07	34	8	26	34	11	23
14.07	21	15	6	21	14	7
23.07	11	2	10	14	6	8

народным его содержанием с апреля по середину мая, повышением к началу июля и резким снижением его количества во второй половине июля, когда, вероятно, активизировались процессы минерализации органического вещества; в слое 0–200 м динамика органического фосфора была аналогичной (табл. 2).

Органический фосфор в водной толще озера, в основном, преобладал над минеральным. В начале апреля, когда потребление минерального фосфора водорослями, скорее всего, было ещё незначительным, их доли в слое 0–15 м были равнозначными, в середине июля относительное количество органического фосфора было минимальным (табл. 3). В слоях 0–15 и 0–200 м динамика относительного содержания форм фосфора была аналогичной.

Азот. Минеральный азот. Аммоний. Источниками аммония в озере являются поверхностный сток, минерализация органического вещества, поступающего со стоком и телами рыб, а также продукты жизнедеятельности гидробионтов.

В 2005 г. концентрация аммонийного азота в водной толще изменялась в значительном диапазоне (табл. 1). С апреля до середины июня его содержание в эвфотическом слое было, в основном, однородным, кроме повышения концентрации в конце апреля.

После летнего максимума, отмеченного в конце июня (149 мкг/л в слое 0–15 м), содержание аммония в течение июля снижалось до аналитического нуля в конце третьей декады. Осенний мак-

Таблица 3. Относительное содержание форм фосфора (%) в оз. Курильское в слоях 0–15 и 0–200 м в весенне-летний период 2005 г.

Дата	0–15 м		0–200 м	
	Р _{мин.}	Р _{орг.}	Р _{мин.}	Р _{орг.}
07.04	50	50	48	52
13.05	12	88	27	73
01.07	25	75	33	67
14.07	75	25	61	39
23.07	23	77	42	58

симум в конце сентября превысил величину летнего пика.

В середине октября, в результате постепенного окисления аммонийного азота, его количество снизилось до 22 мкг/л (содержание нитратов в это время было на высоком уровне — 305–312 мкг/л), минерализация основной массы снёнки только началась.

В слое 0–200 м динамика аммония была аналогичной таковой в слое 0–15 м, величина летнего минимума в конце июня была значительно ниже, чем в слое 0–15 м.

Вертикальное распределение аммонийного азота характеризовалось значительными изменениями в течение периода наблюдений. Наиболее однородное его распределение в слое 0–200 м при диапазоне 16–28 мкг/л наблюдали в начале апреля (рис. 5). В конце апреля общее содержание аммония возросло (28–82 мкг/л); увеличение концентрации отмечали на глубинах 2 м и в слоях 7–15 м и 40–150 м с максимумом на глубине 100 м.

В мае содержание аммонийного азота в озёрной воде снизилось: в середине месяца оно составляло 3–39 мкг/л с максимумом на 7 м и минимумом на глубине 150 м, в конце месяца — 17–31 мкг/л с максимумом на глубине 150 м и минимумом на горизонте 7 м. В июне концентрация аммония в озере была значительно выше, чем в мае: в первой половине месяца в слое 0–200 м минимальное его количество (8 мкг/л) отмечалось на глубине 2 м, максимальное (54 мкг/л) — на глубине 200 м, а во второй, соответственно, 31 мкг/л в поверхностном слое и 87 мкг/л на глубине 7 м. В начале июля вертикальное содержание аммония варьировало в диапазоне 9–29 мкг/л; в середине июля его количество возросло и составляло 22–54 мкг/л, наибольшие величины отмечены на глубинах 10–20 м. В начале третьей декады июля интенсивное окисление аммония обусловило его отсутствие в слое 2–20 м (количество нитратов в это время было на высоком уровне). Максимальное количество аммонийного азота наблюдали на глубине 40 м (78 мкг/л). В августе низкое содержание аммония отмечали в поверхностном слое и на глубинах от 20 до 40 м; повышенная его концентрация (45–54 мкг/л) была характерна для слоя 2–7 м, в слое 100–200 м она увеличилась до 88–161 мкг/л с максимумом на глубине 200 м. В середине сентября в верхнем 20-метровом слое было отмечено относительно однородное распределение аммонийного азота (13–28 мкг/л), максимальное его содержание (110 мкг/л) наблюдали на глубине 70 м.

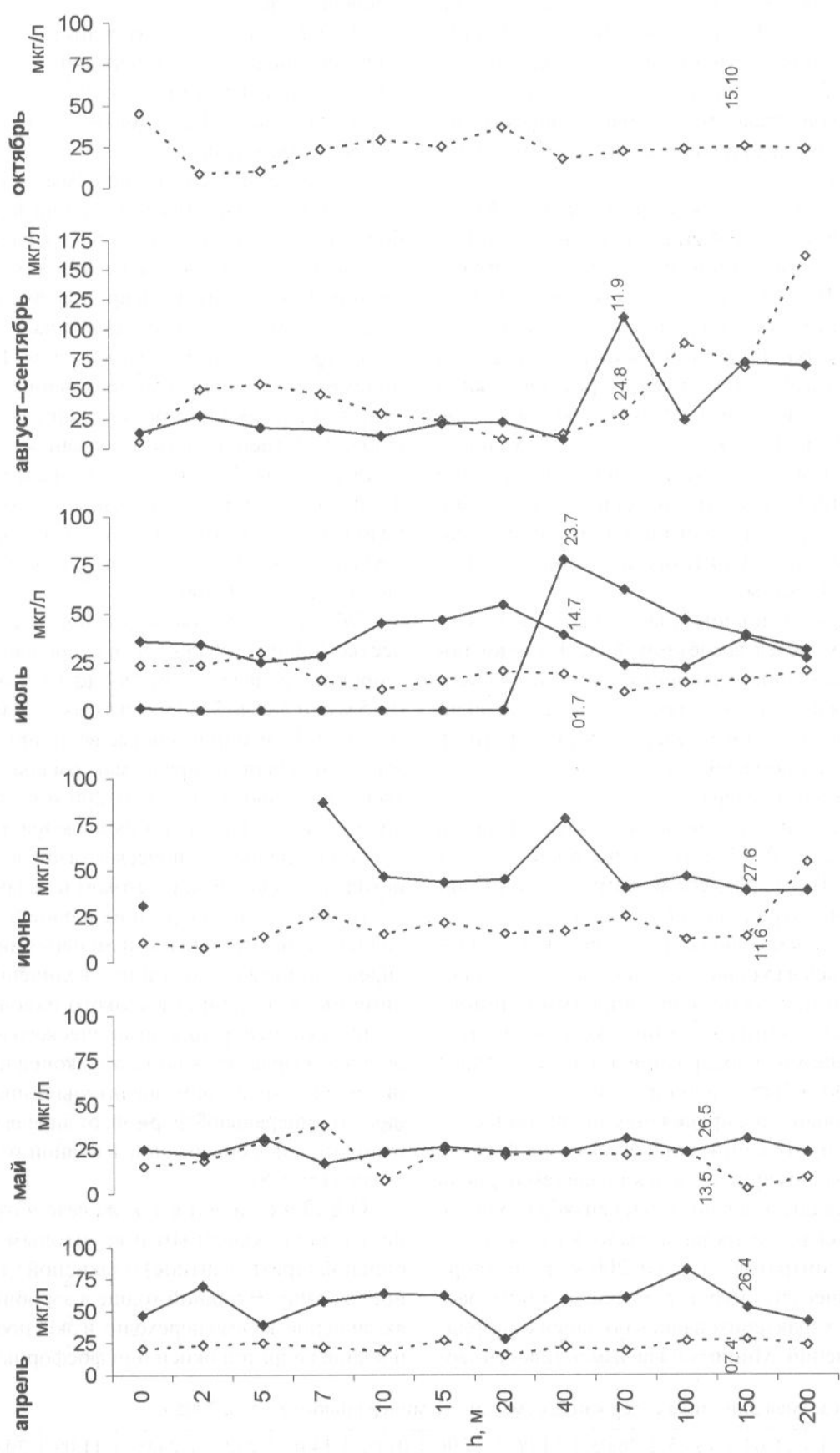


Рис. 5. Вертикальное распределение аммония в оз. Курильское в 2005 г.

В связи с постепенным окислением аммония его содержание в воде к середине октября составляло 9–45 мкг/л. Максимум величин в этот период отмечали в поверхностном слое, минимум — на глубине 2 м, для более глубоких горизонтов была характерна сравнительная однородность величин — 23–37 мкг/л для слоя 7–20 м и 22–25 мкг/л для слоя 70–200 м.

Нитриты. Нитриты как промежуточный продукт окислительно-восстановительных процессов содержатся в водной толще в небольших количествах. В 2005 г. их содержание в воде озера, в основном, характеризовалось диапазоном 0–3 мкг/л (табл. 1). Наибольшая концентрация нитритного азота отмечена в третьей декаде мая (20 мкг/л в слое 0–15 м и 7 мкг/л в слое 0–200 м). Незначительное увеличение их содержания до 4–6 мкг/л также наблюдали в середине июля и в первой половине сентября. В слое 0–15 м процессы нитрификации проходили активнее, содержание нитритного азота было выше, чем в слое 0–200 м.

Нитраты. Основной запас минерального азота в озере создаётся за счёт нитратов. Наличие постоянно высокого их количества в воде озера поддерживается поступлением со стоком, недоиспользованием из-за малого содержания фосфатов в воде и накоплением в водной толще в связи со слабой проточностью озера.

В 2005 г. наибольшие величины содержания нитратов в слое 0–15 м отмечены в конце июля (290 мкг/л). После летнего минимума в конце августа их концентрация вновь увеличилась и с начала второй декады августа до середины сентября сохранялась на уровне 280–300 мкг/л, чему способствовали продукты окисления аммонийного азота от разложения органического вещества. Сезонная динамика содержания нитратов в слоях 0–15 и 0–200 м была сходной (табл. 1).

Вертикальное распределение нитратов в слое 0–200 м на протяжении апреля–октября было, в основном, равномерным, за исключением периода с третьей декады июля по конец сентября (рис. 6). В третьей декаде июля наблюдалось наибольшее содержание нитратов в слое 0–200 м. В сентябре общее количество нитратов возросло, но их распределение характеризовалось большей однородностью значений. Минимальная изменчивость вер-

тикального распределения нитратного азота существовала в октябре.

В 2005 г. нитратный азот доминировал в озёрной воде среди форм минерального азота в течение всего анализируемого периода: его доля изменялась от 61 до 100% в слое 0–15 м и от 70 до 93% в слое 0–200 м (рис. 7).

Относительное содержание аммония и нитритов в слое 0–15 м на протяжении сезона варьировало в более широком диапазоне, чем в слое 0–200 м, вследствие более интенсивной минерализации органического вещества в приповерхностном слое по сравнению со всей толщей воды.

Суммарный минеральный азот. В сезонной динамике суммарного минерального азота отмечена тенденция к его росту с апреля по октябрь (табл. 4). Изменчивость содержания минерального азота в слоях 0–15 и 0–200 м характеризовалась, в основном, синхронностью, но в слое 0–15 м в конце июля и начале второй декады сентября его было меньше, а в конце июня и конце сентября — больше, чем в слое 0–200 м.

Общий и органический азот. В 2005 г. количество общего азота (TN) в озере варьировало в широких пределах — от 597 до 1970 мкг/л в слое 0–15 м и от 588 до 2360 мкг/л в слое 0–200 м (табл. 5). В слое 0–15 м минимальные величины его содержания отмечены в апреле, максимальные — в третьей декаде июля. В слое 0–200 м количество валового азота с апреля по июль возрастало.

Поступление органического азота в водоем происходит, в основном, со стоком и телами рыб.

В 2005 г. его содержание в слое 0–15 м отличалось незначительными изменениями величин с апреля до начала июля и их увеличением в середине июля, в период высокого паводка. В слое 0–200 м концентрация органического азота, как и общего, возрастала с апреля по конец июля. Органический азот в озере значительно превалировал над его минеральной формой, от апреля к июлю его относительное содержание в водной толще увеличилось (рис. 8).

Общее железо. Железо в озеро поступает с поверхностным и грунтовым стоками в окисной (трехвалентное) и закисной (двухвалентное) формах. В водной толще в аэробных условиях закисное железо переходит в окисное состояние и в виде гидратов окиси или фосфорных соедине-

Таблица 4. Сезонная динамика содержания суммарного минерального азота в 2005 г.

Дата	07.04	26.04	13.05	26.05	11.06	27.06	01.07	14.07	23.07	24.08	11.09	30.09	15.10
0–15 м	172	246	241	279	255	385	237	274	291	216	338	465	329
0–200 м	124	264	250	280	271	339	243	282	458	241	387	407	338

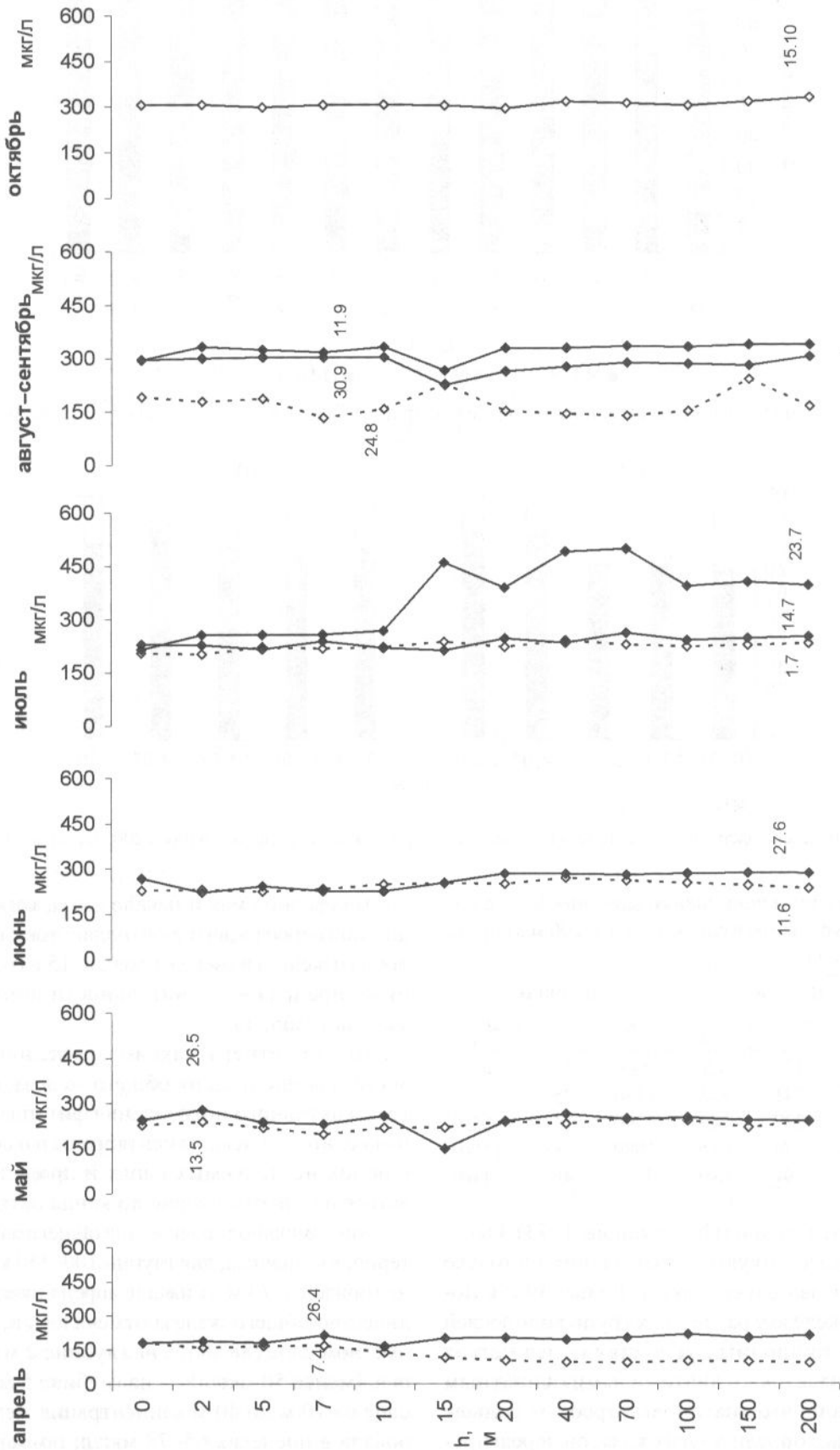


Рис. 6. Вертикальное распределение содержания нитратов в апреле–октябре 2005 г. в оз. Курильское

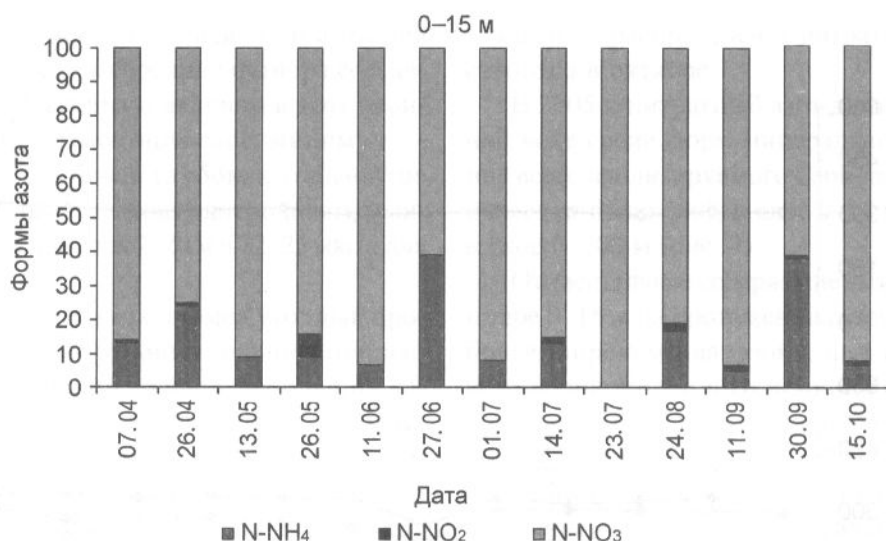


Рис. 7. Относительное содержание аммония, нитритов и нитратов (%) в оз. Курильское в 2005 г. в слоях 0–15 и 0–200 м

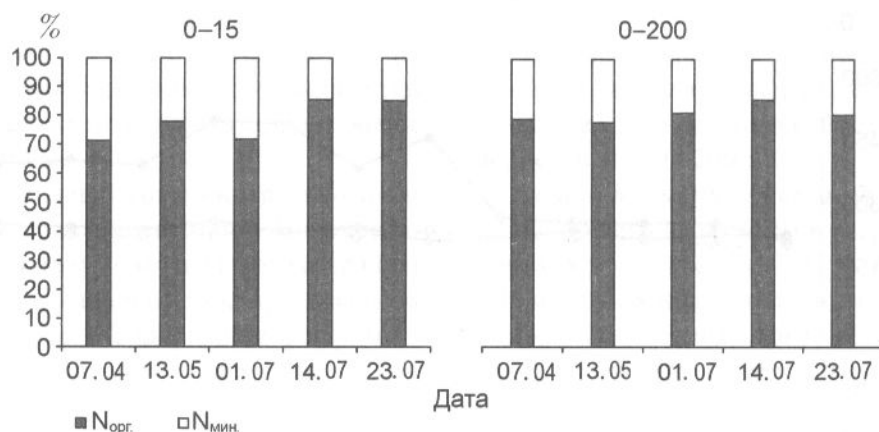


Рис. 8. Относительное содержание форм азота (%) в воде оз. Курильское в апреле, мае и июле 2005 г. в слоях 0–15 и 0–200 м

Таблица 5. Сезонная динамика содержания форм азота (мкг/л) в оз. Курильское в слоях 0–15 и 0–200 м в апреле, мае и июле 2005 г.

Дата	0–15 м			0–200 м		
	TN	N _{мин.}	N _{орг.}	TN	N _{мин.}	N _{орг.}
07.04	597	172	426	588	124	464
13.05	1090	241	848	1130	250	877
01.07	840	237	603	1290	243	1050
14.07	1890	274	1620	1980	281	1700
23.07	1970	291	1680	2370	458	1110

ний осаждается на дно (Привезенцев, 1973). Окислы железа способствуют седиментации не только фосфора, но и азота и углерода (Thomas, 1955). Потребность в железе у различных групп водорослей различна. В природных условиях более четкая связь наблюдается с диатомовыми. Опытным путём доказано, что диатомовые требуют больше железа, чем водоросли других классов, и реагируют более резко на его добавление (Гусева, 1961; Redfield et al., 1963; Golterman, 1969).

В середине мая и начале июля, когда происходило активное развитие фитопланктона, содержание общего железа в озере в слоях 0–15 и 0–200 м было ниже предела чувствительности применяемого метода (табл. 1).

После летнего максимума величин в конце августа концентрация общего железа, в результате его активного потребления фитопланктоном, в начале второй декады сентября резко сократилась в обоих исследуемых слоях и продолжала оставаться на низком уровне до конца октября.

Минимальное содержание общего железа характерно, в основном, для глубин 100–150 м, в июле — на горизонте 70 м. В начале апреля наибольшее количество общего железа отмечалось в подповерхностном слое (88 мкг/л на глубине 2 м), наименьшее (менее 50 мкг/л) — на глубине 5 м (рис. 9). В слое от 10 м до 40 м концентрация железа варьировала в пределах 65–78 мкг/л; по мере нарастания глубины его количество снижалось и на горизонтах 70–200 м составляло около 50 мкг/л. В кон-

це апреля концентрация железа снизилась более чем вдвое; наименьшее содержание наблюдалось на глубинах 0–10 м и 70–100 м. Дальнейшее снижение концентрации железа продолжалось по середину мая, когда на глубинах 7–150 м она была значительно ниже предела чувствительности метода, а на глубине 200 м железо отсутствовало. В конце мая его содержание значительно увеличилось: на горизонтах 2, 15 и 150 м оно составляло, соответственно, 78, 71 и 81 мкг/л, на остальных горизонтах не превышало 55 мкг/л.

В июне, в начале массового развития *Aulacoseira subarctica*, доминирующей в озере диатомовой водоросли, концентрация железа характеризовалась более низкими величинами по сравнению с концом мая. В первой половине июня более высокое его содержание наблюдали на глубинах 2 и 100 м, минимальное — на горизонте 150 м; на остальных горизонтах его количество было ниже 50 мкг/л. В конце месяца максимум железа наблюдали на глубине 100 м (67 мкг/л).

Наибольшую изменчивость вертикального распределения железа отмечали в июле. В начале июля вертикальное распределение было однородным при общем низком его содержании. В середине месяца, в период пика половодья, количество железа в воде значительно возросло: в верхнем 15-метровом слое составляло 78–90 мкг/л, далее происходило нарастание концентрации до 106 мкг/л на глубине 40 м с последующим снижением. В конце месяца содержание общего железа сократилось по сравнению с серединой июля, но оставалось достаточно высоким (53–103 мкг/л), с максимумом в поверхностном слое. В августе наблюдали наиболее высокое содержание железа (92–120 мкг/л), с максимумом на глубине 70 м и минимумом на глубинах 20 и 200 м. На остальных глубинах его количество варьировало в пределах 96–110 мкг/л.

В сентябре и октябре наблюдали однородность вертикального распределения железа при общей низкой фоновой концентрации.

Кремний. Концентрация кремния в озере зависит от его поступления с поверхностным стоком, частичного растворения створок диатомовых, выщелачивания из подстилающих пород и потребления его диатомовым планктоном. Кремний влияет как непосредственно на развитие диатомей, так и косвенно, удерживая в водной толще коллоидальные соединения железа — одного из важнейших органогенных элементов, необходимого для развития диатомовых водорослей. Кремний потребляется фитопланктоном во всех присутствующих в воде растворенных формах (Гусева, 1961). Про-

цесс растворения кремниевых оболочек, и, соответственно, возврат этого элемента в водную толщу задерживается из-за наличия органических покровов и начинается лишь после их разрушения. Регенерация кремниевой кислоты из-за крайне медленного растворения створок диатомовых низка по сравнению с фосфором и азотом (Sverdrup et al., 1942). Значительная часть кремния сравнительно быстро выпадает из круговорота в верхнем слое воды из-за оседания диатомовых (Вотинцев, 1961).

Сезонная динамика кремниевой кислоты зависит от интенсивности развития диатомового планктона. В апреле 2005 г., в связи со значительными зимними запасами, количество кремния в слое 0–15 м было относительно высоким, с усилением весенней вегетации водорослей его содержание снижалось, средневзвешенные величины от апреля к концу июля сократились, соответственно, от 1,9 до 0,6 мг/л (табл. 1). Низкое содержание кремниевой кислоты сохранялось до середины октября, величины её средневзвешенного содержания со второй половины сентября до середины октября не превышали 0,8 и 0,7 мг/л в рассматриваемых слоях.

Вертикальное распределение кремния обусловлено, в основном, его потреблением диатомовыми водорослями и поступлением со стоком. В апреле содержание кремния в толще 0–200 м варьировало в диапазоне 1,2–1,8 мг/л и характеризовалось равномерностью распределения, особенно на глубинах от 15 до 70 м, за исключением повышенного содержания в приповерхностном слое в начале месяца (3,7 мг/л на глубине 2 м) (рис. 10). В мае более высокая концентрация кремния отмечена в первой половине месяца на глубинах 0–7 м (1,1–1,3 мг/л), на горизонте 15–100 м содержание кремния в течение месяца изменялось мало (0,9–1,0 мг/л) и характеризовалось равномерным распределением. В июне при более низкой фоновой концентрации кремния (0,6–0,8 мг/л) наблюдалось наиболее равномерное его распределение в толще воды.

В июле сравнительно равномерное распределение содержания кремния по вертикали наблюдалось на глубинах 2–70 м. Очень высокая концентрация кремния в начале июля зафиксирована на глубине 150 м (7,7 мг/л), в конце месяца увеличение его содержания до 1,6 мг/л отмечали в поверхностном слое. В августе вертикальное распределение кремния характеризовалось однородностью на глубинах 20–200 м (0,6–0,7 мг/л) и большим диапазоном изменчивости в верхнем 15-метровом слое (0,7–1,3 мг/л) с максимумом на горизонте 5 м. В течение сентября происходило снижение общей фоновой концентрации при сравнительно рав-

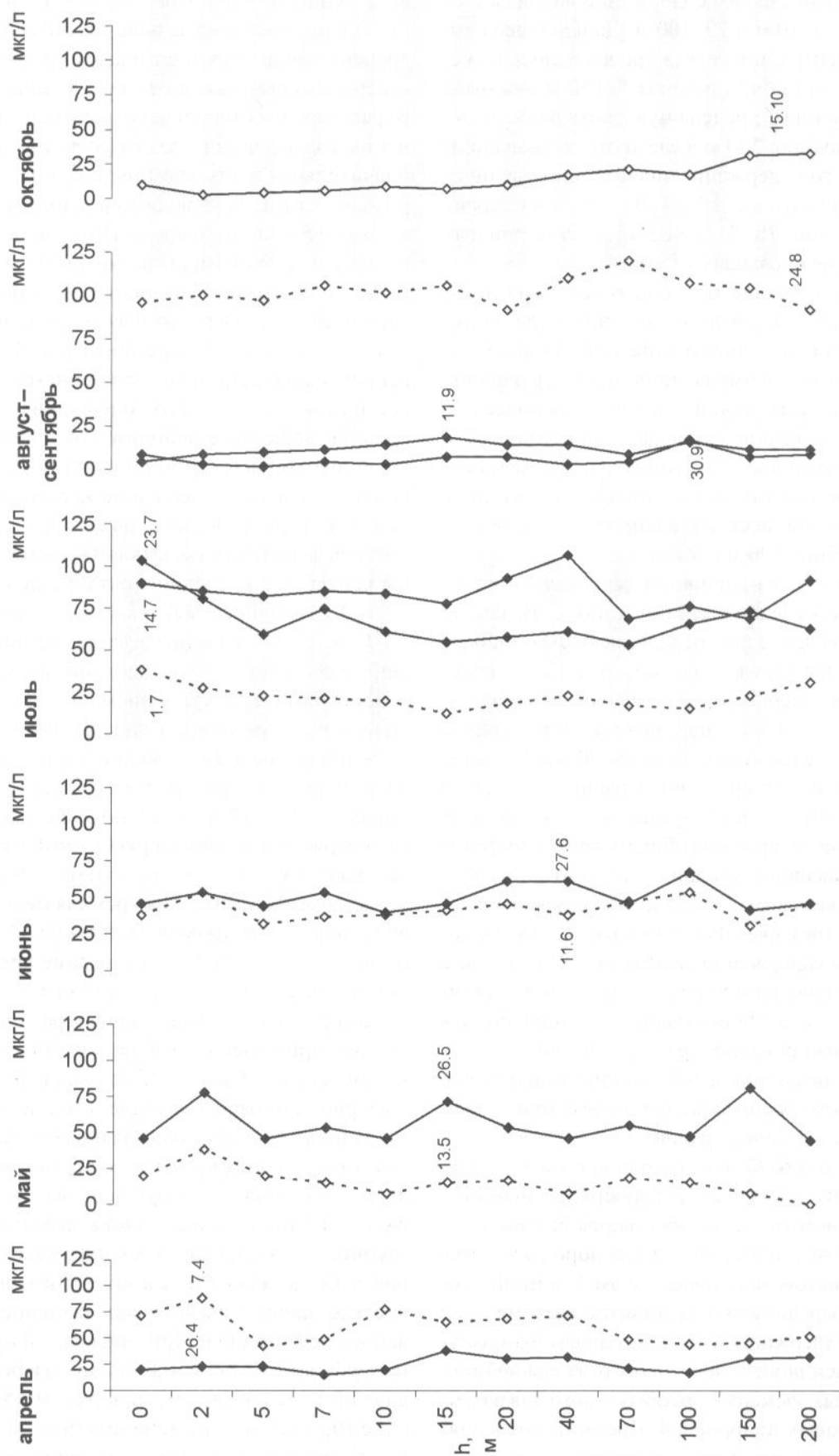


Рис. 9. Вертикальное распределение содержания железа в 2005 г.

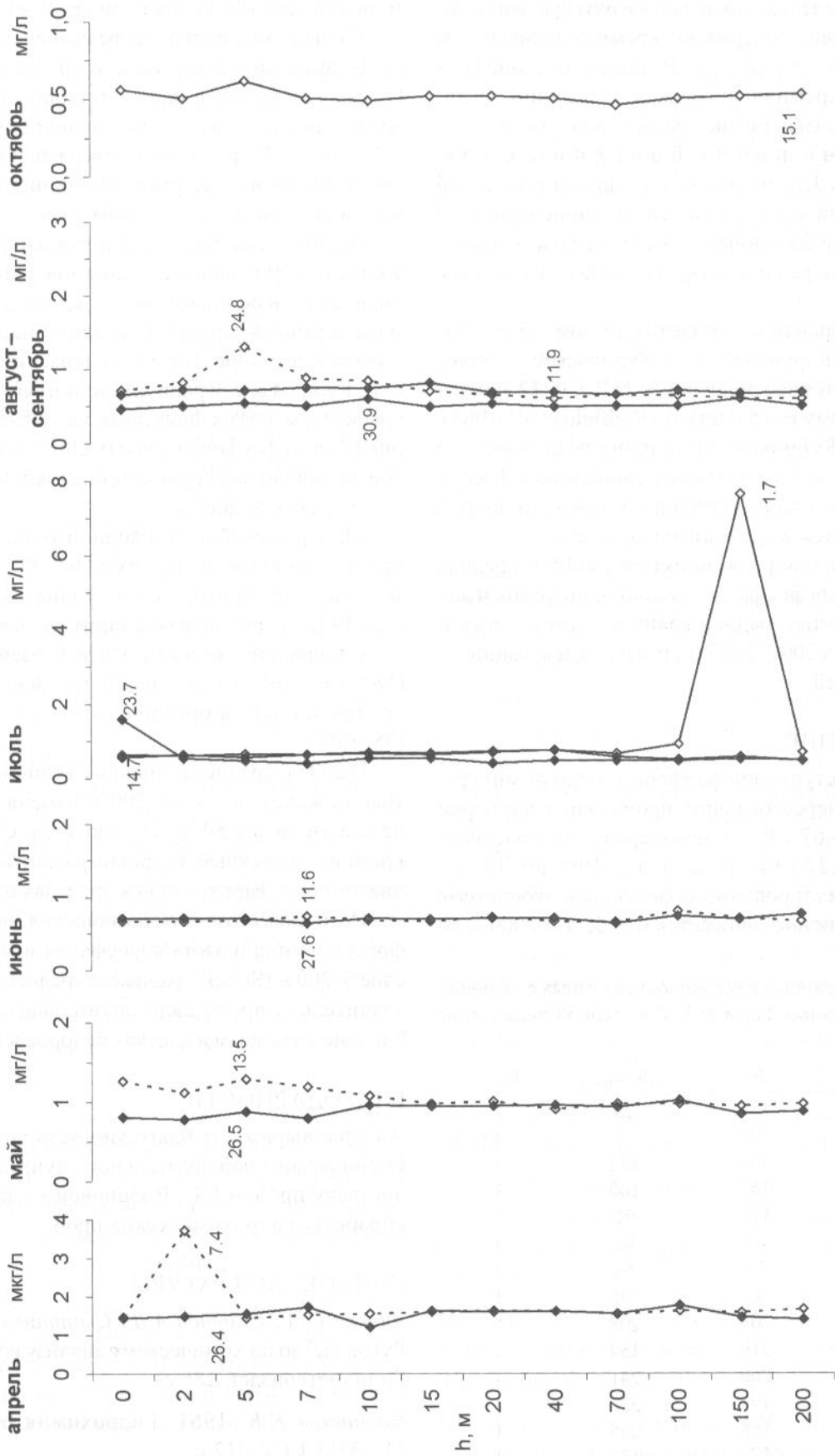


Рис. 10. Вертикальное распределение кремния в 2005 г.

номерном вертикальном распределении — от 0,7–0,8 мг/л до 0,5–0,6 мг/л. Аналогичный характер распределения наблюдался в октябре, когда диапазон величин содержания кремния в слое 0–200 м составлял 0,5–0,6 мг/л. В июле и октябре концентрация кремния снижалась до величин, лимитирующих развитие диатомовых водорослей.

Соотношение биогенных элементов. Интенсивность развития и видовой состав фитопланктона зависят от концентрации и соотношения биогенных элементов в воде, главным образом минерального азота и фосфатов (Thomas, 1953).

Оптимальным для развития диатомового планктона, доминирующего в оз. Курильское (Носова, 1972), является соотношение Si:N:P = 36:12:1, близкое к таковому в его клетках (Redfield et al., 1963). В воде оз. Курильское в течение года отмечали избыток кремния и азота по отношению к фосфору (табл. 6), что подтверждает лимитирующую роль фосфатов в экосистеме водоема.

В целом, с апреля по октябрь 2005 г. средняя концентрация фосфатов, аммония, нитратов и железа была выше средней величины для аналогичного периода 2001–2005 гг., нитритов и кремния — ниже средней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2005 г. поступление фосфора в озеро от минерализации отнерестовавших производителей нерки составило 4,67 т Р, что ниже среднемноголетнего значения (6,27 т Р) для периода с 1980 по 2005 гг. Запас аккумулированного фосфора в экосистеме озера постепенно снижается от 132 т в 2000 г. до

Таблица 6. Сезонная изменчивость атомных соотношений минеральных форм Si:N:P в озёрной воде в слое 0–15 м в 2005 г.

Дата	Si	N _{мин.}	P _{мин.}
07.04	135	25	1
26.04	106	35	1
13.05	405	172	1
26.05	157	100	1
11.06	122	91	1
27.06	83	92	1
01.07	78	56	1
14.07	45	39	1
23.07	204	208	1
24.08	319	154	1
11.09	266	241	1
30.09	191	332	1
15.10	188	235	1
Среднее	177	137	1

94 т в 2005 г., но, по-прежнему, остаётся высоким относительно среднемноголетней величины данного показателя (89 т) для периода 1940–2005 гг.

Наличие достоверной корреляционной связи между фосфатами в воде озера и уровнем воды в р. Озерная (в период с мая по октябрь коэффициент корреляции (r) между этими величинами составил 0,58, при n = 11, p < 0,01) подтверждает роль поверхностного стока в формировании биогенного, и в частности фосфатного, режима озера.

В 2005 г. содержание минерального фосфора в слое 0–200 м варьировало в пределах от «следов» до 15, в основном, от «следов» до 6 мкг/л, с максимумом в апреле и середине июля и минимумом в сентябре. Низкое содержание фосфатов в оз. Курильское ограничивало потребление фитопланктоном других биогенных элементов. Содержание общего фосфора в слое 0–200 м (14–34 мкг/л) обеспечивало высокую потенциальную рыбопродуктивность водоема.

Минеральный азот в водной толще представлен, в основном, нитратами (65–95% от суммы минеральных форм), доля аммония составляла от 0 до 39%; нитритов, в основном, не более 3%.

Содержание общего азота в озере высокое (588–2360 мкг/л в слое 0–200 м). Основная масса его представлена органическими соединениями (78–88%).

В 2005 г. средневзвешенные величины концентрации железа в слое 0–200 м изменялись в диапазоне от менее 50 до 110 мкг Fe/л. Содержание кремния, зависящее от уровня развития биомассы диатомовых, варьировало в пределах 0,5–1,6 мг/л.

Величины атомного соотношения минеральных форм кремния и азота к фосфатам в воде озера в слое 0–200 м (Si:N:P), равные, в среднем, 142:108:1, значительно превышали оптимальные значения, близкие к таковым в клетках водорослей (36:12:1).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Озерновского наблюдательного пункта, за сбор и доставку проб, и Е.С. Вороновой — за участие в обработке гидрохимических проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А. 1973. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 286 с.
- Вотинцев К.К. 1961. Гидрохимия оз. Байкал. М.: АН СССР, 312 с.

- Гусева К.А. 1961. Факторы, обуславливающие развитие фитопланктона в водоеме // Первичная продукция морей и внутренних вод. Минск: Изд-во Мин. высш., средн. спец. и проф. образ. С. 301–307.
- Гутельмахер Б.Л. 1982. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л.: Наука, Лен. отд-ние, 261 с.
- Драчев С.М., Былинкина А.А., Трифонова Н.А., Кудрявцева Н.А. 1976. Биологические продукционные процессы в бассейне Волги. Л. С. 18–24.
- Егорова Т.В. 1967. Основные закономерности, определяющие динамику численности красной (*Oncorhynchus nerka* Walb.) бассейна р. Озерной: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток: ТИНРО, 19 с.
- Захаров Д.В. 2002. Гидрологические и гидрохимические условия воспроизводства нерки в основных притоках оз. Курильское в летне-осенний период 2001 г. // Материалы III научной конф. «Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей». Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО. С. 48–50.
- Комплексные исследования озера Курильского (Южная Камчатка). 1986. Владивосток: ДВГУ, 208 с.
- Калинина И.Б. 2004. Материалы по содержанию растворенного углерода и его форм в нерковых водоемах Камчатки и Корякского нагорья // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана: Сб. науч. тр. Камчат. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Вып. 7. С. 51–58.
- 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., Крогиус Ф.В. 1937. Очерк Курильского озера и биология красной *Oncorhynchus nerka* в его бассейне // Тр. Тихоокеан. комитета. № 4. 165 с.
- Лепская Е.В., Уколова Т.К., Свириденко В.Д. 2000. Фитопигменты в планктоне озера Курильское (предварительные результаты) // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана: Сб. науч. тр. Камчат. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Вып. 5. С. 161–170.
- Лепская Е.В., Уколова Т.К., Калинина И.Б., Свириденко В.Д. 2005. Органическое вещество озера Курильское и Паланское (Камчатка) и его связь с элементами биоты // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. Владивосток: Дальнаука. С. 199–214.
- Лепская Е.В., Маслов А.В. 2006. К вопросу о выделении трофогенной зоны в озере Курильском (Южная Камчатка) // IX съезд Гидробиологического общества РАН. Тез. докл. Т. 1. Тольятти. С. 269.
- Миловская Л.В. 2000. Роль фосфора в формировании рыбопродуктивности Курильского озера (Южная Камчатка) // Докл. Второй Камчатской обл. научно-практ. конф. «Проблемы охраны и рационального использования биоресурсов Камчатки» (3–6 октября 2000 г. Петропавловск-Камчатский). С. 92–98.
- 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.
- Миловская Л.В. 2004. Общая гидрохимическая характеристика и трофический статус озера Курильское // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана: Сб. науч. тр. Камчат. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Вып. 7. С. 59–69.
- Миловская Л.В., Дубынин В.А. 1999. Тенденции в изменении рыбопродуктивности Курильского озера // Тез. обл. науч.-практ. конф. «Проблемы охраны и рационального использования биоресурсов Камчатки» (10–12 июня 1999 г. Петропавловск-Камчатский). С. 73–74.
- Миловская Л.В., Уколова Т.К. 1993. Влияние фертилизации на фосфорный режим Курильского озера // Исследования биологии и динамики численности промысловых рыб Камчатского шельфа. Вып. II. Камч. отд-ние Тихоокеан. ин-та рыб. хоз-ва и океанографии. Петропавловск-Камчатский. С. 37–49.
- Носова И.А. 1968. Вертикальное распределение зоопланктона Курильского озера // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Т. 64. С. 151–167.
- Носова И.А. 1972. Биология, динамика численности и продукция *Cyclops scutifer* Sars в Курильском озере: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: ВНИРО, 25 с.
- Павельева Е.Б., Ларионов Ю.В. 1979. Продуцирование органического вещества в оз. Курильском // Журн. общ. биологии. Т. 15. № 5. С. 689–699.
- Пономарев В.П., Тарасов В.И., Минятов В.К. 1986. Водный баланс озера Курильского // Комп-

лексные исследования озера Курильского (Южная Камчатка). Владивосток: ДВГУ. С. 51–67.

Привезенцев Ю.А. 1973. Гидрохимия пресных водоемов. М.: Пищ. пром-сть, 120 с.

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.

Селифонов М.М. 1975. Промысел и воспроизводство красной бассейна р. Озерной: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии, 23 с.

Синяков С.А. 1993. Круговорот фосфора и параметры экосистемы Курильского озера при оптимальном заполнении нерестилиц // Исследования биологии и динамики численности промысловых рыб камчатского шельфа. Вып. II. Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО. 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: ДВГУ. С. 134–142.

Уколова Т.К. 1988. Гидрохимический режим озера Курильского в связи с его фертилизацией // Проблемы фертилизации лососевых озер Камчатки. Владивосток: ТИНРО. С. 25–33.

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.

Уколова Т.К., Свириденко В.Д. 2004. Гидрохимический режим озера Курильское в 2002 г. // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана:

Сб. науч. тр. Камчат. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Вып. 7. С. 70–78.

Ashley K.A., Thompson L.C., Lasenby D.C., McEachem L., Smokorowski K.E., Sebastian D. 1997. Restoration of an interior lake ecosystem: the Kootenay Lake fertilization experiment. Wat. Qual. Res. J. Can. V. 32. P. 192–212.

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

Milovskaya L.V., Selifonov M.M., Sinyakov S.A. 1998. Ecological functioning of lake Kuril relative to sockeye salmon production // N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull. Vancouver, Canada. № 1. P. 434–442.

Northcote T.G. 1973. Some impacts of man on Kootenay Lake and its salmonids. Great Lakes Fish. Comm. Tech. Rep. 25.

Redfield A.C., Ketchum B.H., Richards F.A. 1963. The influence of organisms on the composition of sea water // The Sea, Ideas and Observations. N.Y.: Intersciences. V. 2. P. 26–77.

Stockner J.G. 1987. Lake fertilization: the enrichment cycle and lake sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) production // In H.D. Smith, L. Margolis, and C.C. Wood, eds. Sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) population biology and future management. Can. Spec. Pub. Fish. Aquat. Sci. 96. P. 198–215.

Sverdrup H.U., Johnson M.W., Fleming R.H. 1942. The Ocean: Their Physics, Chemistry and General Biology. N.Y.: Prentice-Hall, 1087 p.

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

Thomas E.A. 1953. Zur Bekämpfung der See Eutrophierung: empirische und experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Minimumstoffe in 46 seen der Schweiz und Angrenzender Gebeite // Monatsbl. Schweiz. Vereins von Gas und Wasserfaenmännern. Bd. 33. № 2. P. 25–32; № 3. P. 71–79.