



• НАУКА •

Новосибирск

Байкал у нас один. Состояние озера в настоящее время вызывает тревогу: волокна целлюлозы, плавающие по всей водной поверхности, образуют мысы и отложения на берегах, высокотоксичные полихлорированные бифенилы найдены в заметных количествах в фито-, зоопланктоне и жире нерпы.

Своеобразие водных масс Байкала (опускание верхней зоны вод в нижнюю и наоборот) приводит к тому, что загрязнению подвергаются не только прибрежные воды, но и глубоководная их часть. Органическое вещество антропогенного происхождения, попадая на дно озера, будет способствовать увеличению внутренней биогенной нагрузки, что, в свою очередь, приведет к необратимым процессам.

Проблема сохранения священного озера для нас и наших потомков не должна никого оставить равнодушным.

Е. Н. ТАРАСОВА

А. И. МЕЩЕРЯКОВА

Современное состояние гидрохимического режима озера Байкал

Na^+

K^+

Ca^{2+}

HCO_3^-

Fe^{3+}

Mg^{2+}

SO_4^{2-}

Cl^-

Хлорофилл "α"

C

N

P

Si

Взвесь

NO_3^-

PO_4^{3-}

Porg

Norg

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК.
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
БАЙКАЛЬСКИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ

Е.Н. ТАРАСОВА

А.И. МЕЩЕРЯКОВА

СОВРЕМЕННОЕ
СОСТОЯНИЕ
ГИДРОХИМИЧЕСКОГО
РЕЖИМА
ОЗЕРА БАЙКАЛ

Ответственный редактор
академик РАН Г.И. Галазний



ВО "НАУКА"
НОВОСИБИРСК
1997

Современное состояние гидрохимического режима озера Байкал / Е. Н. Тарасова, А. И. Мешерякова. - Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1992. - 144 с. ISBN 5-02-030595-2.

В монографии изложены итоги многолетних систематических исследований химического состава вод Байкала, его притоков и атмосферных осадков. Оценено современное состояние гидрохимического режима озера с точки зрения загрязнения и эвтрофирования вод. Показано его изменение за последние 30 лет. Представленные материалы являются началом изучения устойчивости экосистемы озера.

Книга предназначена для гидрохимиков, гидробиологов, геологов, специалистов по охране и использованию водных ресурсов.

Табл. 47. Ил. 52. Библиогр.: 155 назв.

Рецензенты

доктор геолого-минералогических наук И. С. Ломоносов
кандидат химических наук Г. М. Шпейзер

Утверждено к печати

Байкальским экологическим музеем СО РАН

ВВЕДЕНИЕ

Техногенное воздействие на геосистемы проявляется в бактериальном, химическом загрязнении и в эвтрофировании водоемов. Любая реакция водоемов (загрязнение и эвтрофирование, которые, как правило, проявляются одновременно) приводит к нарушению экологического равновесия (при увеличении внутренней нагрузки это нарушение становится уже необратимым); опасна она и для человека (вода и рыба становятся непригодными для их употребления).

Возможную нагрузку на водоем можно установить, изучив его стабильность и пределы ее естественных изменений. Взаимодействие суши с водоемами исследовано многими учеными. /Винберг, 1960; Goldman, Carter, 1965; Vollenweider, Beeton, 1968; Edmonson, 1972; Vollenweider, Dillon, 1974; Dillon, 1975; Kichner, Dillon, 1975; Россолимо, 1977; Мартынова, 1984; Duce, 1986/. Создано множество моделей, учитывающих внешнюю и внутреннюю биогенную нагрузку для оценки состояния водных систем, полную сводку которых можно найти в монографиях Хендерсона-Селлера /1987/ и Йоргенсена /1985/. Olson /1963/ впервые показал, что устойчивость почвенных систем зависит от степени стабильности гумусовых веществ. По аналогии с почвами показатель Олсона для водных экосистем был успешно применен Секи Хумитакэ /1986/.

Признаки загрязнения и эвтрофирования водоемов, как отмечают все авторы, занимающиеся данной проблемой, могут быть замечены при многолетних наблюдениях.

Байкал относится к хорошо изученным водоемам мира. Гидрохимическое исследование озера и его притоков началось с 1925 г. с организации Постоянной Байкальской Экспедиции во главе с Г. Ю. Верещагиным. Детальные изучения проводились по всему озеру /Верещагин, 1927, 1932, 1936, 1947, 1949/, а также на 55 его притоках /Форш, 1931/. Систематические исследования гидрохимического режима вод Байкала и его основных притоков начаты К. К. Вотинцевым с 1947 г. Под его руководством количественно оценен общий химический сток в Байкал и химический баланс озера за 1950-1955 гг. /Вотинцев, 1961; Вотинцев и др., 1965/. Исследованы процессы миграции отдельных химических элементов в озере: кремния, железа и др. /Вотинцев, 1955, 1956, 1958, 1965, 1967а, б, 1969, 1970, 1978/.

и др. /, а также органического вещества и биогенных элементов /Вотинцев, 1961а, 1968, 1971а-в, 1983; Вотинцев и др., 1975; Тарасова, 1975; и др. /. Выяснен круговорот органического вещества в Байкале, включая пелагиаль – важнейшую экосистему озера, определяющую его общую биологическую продуктивность /Вотинцев, 1971а, 1977, 1978; и др. /.

В связи с возрастающим антропогенным влиянием на Байкал были разработаны теоретические основы нормирования предельно допустимых концентраций (ПДК) ряда компонентов, поступающих в озеро с промышленными и бытовыми сточными водами, а также показатели ПДК для ряда компонентов /Галазий, Вотинцев, 1973; Вотинцев, Галазий, 1969, 1977/.

Для оценки возможных изменений состава воды Байкала под влиянием хозяйственной деятельности человека разработан проект Государственного стандарта качества байкальских вод /Вотинцев, Мизандронцев, 1981/ и изучены основные их формирующие процессы /Вотинцев, 1985/.

Мы не ставили задачу полностью осветить заслуги К. К. Вотинцева, но его монография "Гидрохимия озера Байкал" (1961 г.) и другие работы позволили провести сравнение с материалами последних лет, когда в связи с развитием народного хозяйства в бассейне Байкала крайне актуальной стала задача оценки масштабов антропогенного влияния на экосистему озера, включая проблему загрязнения и возможного эвтрофирования вод, что и явилось целью наших исследований.

Анализы компонентов ионного состава выполнены, как и в 50-х годах, опытными гидрохимиками А. И. Мещеряковой и Т. П. Кожевниковой.

Изменчивость содержания взвешенного и органического вещества и биогенных элементов (азота, фосфора, кремния) в водах озера и его притоках анализировалась с 1965 по 1989 г. Указанные компоненты определены Е. Н. Тарасовой. Ею же проведено обобщение всего материала.

Огромное влияние, глубокая заинтересованность, ценные советы и предложения по исследованию Байкала Б. А. Скопинцева вдохновили авторов на написание настоящей работы.

Большую помощь в отборе проб и первичной подготовке их к анализу оказали Л. П. Голобокова, Т. И. Протопопова, Н. В. Верболова, а также Т. В. Ходжер, Э. Л. Афонасьева, Н. Г. Гранин, П. П. Шерстянкин, О. Г. Нещетаева, Г. А. Слесов, В. В. Власенко, члены команды судов "Дымовский", "Обручев" и "Г. Ю. Верещагин".

Серьезная поддержка в выполнении настоящей работы получена от Г. И. Галазиева. Авторы глубоко признательны всем перечисленным лицам.

Глава I

МЕТОД И МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование влияния хозяйственной деятельности человека на экосистему Байкала с точки зрения его загрязнения и возможного эвтрофирования основано на изучении тенденций изменения химического состава вод озера с учетом природных и антропогенных источников поступления веществ и их выноса Ангарой.

За показатели загрязнения приняты обусловленные хозяйственной деятельностью минеральные вещества, в том числе сульфаты и хлориды, нефтепродукты (углеводороды), фенолы, а также взвешенные вещества. Материалы по химическому балансу Байкала, полученные за 1970, 1971, 1981-1984 гг., сравнивались с таковыми за период с 1950 по 1955 г. /Вотинцев и др., 1965/. Отметим, что эти периоды близки по водному стоку притоков бассейна озера. Систематические наблюдения за содержанием компонентов ионного состава (гидрокарбонатам, сульфатам, хлоридам, кальцию, магнию, натрию и калию) проводились ежемесячно в 16 основных притоках озера, площадь бассейна которых составляет 92,8 % площади бассейна озера (рис. 1). Методы определения химических компонентов как в 1970-1980 гг., так и в 50-х годах, те же стандартные, принятые в гидрохимической практике /Верещагин, 1933; Алекин, 1958; Глазунов, 1963/.

Точность определения содержания химических компонентов не превышает 5-7 %.

Оценка атмосферного поступления компонентов ионного состава нами приводится по опубликованным материалам /Вотинцев, Ходжер, 1981; Вотинцев и др., 1983; Тарасова и др., 1986; Ходжер и др., 1987/. Относительная ошибка расчета выноса вещества (S_{φ}) с притоками озера зависит от относительной ошибки вычисления стока этих рек (S_Q) и относительной ошибки определения средней концентрации за рассматриваемый период (S_k):

$$S_{\varphi} = \sqrt{S_Q^2 + S_k^2}.$$

Ошибка определения средней концентрации вещества складывается из:

- погрешности подсчета средней концентрации вещества в се-



Рис. 1. Пункты отбора проб воды на акватории оз. Байкал и в устьевых участках его притоков.

1 - режимное наблюдение; 2 - эпизодическое исследование.

чении реки, которая зависит от неравномерности распределения вещества по сечению реки и числа проанализированных проб;

- погрешности, возникающей вследствие того, что средняя концентрация вещества в сечении реки, определенная по данным i -й гидрохимической съемки и распространенная на весь i -й расчетный период, недостаточно точно характеризует действительную среднюю концентрацию вещества за этот период. Эта погрешность зависит от изменчивости средней концентрации вещества в расчетном створе реки во времени и от числа гидрохимических съемок.

Для оценки относительной ошибки использована формула

$$S_k = \sqrt{\frac{1}{n} \left(v_b^2 + \frac{v_c^2}{k} \right)},$$

где S_k - относительная ошибка средней концентрации вещества, n - число гидрохимических съемок за расчетный период, v_c - средняя относительная ошибка единичного определения концентрации вещества, k - число проб в сечении реки, v_b - показатель, характеризующий изменчивость средней концентрации вещества в сечении реки за расчетный период.

Для установления такой ошибки нами проведен химический анализ проб воды, отобранных ежедневно в течение месяца на пяти сечениях по три пробы на каждом в период межени (февраль) и паводка (май) в р. Селенге (с максимальным водным стоком) и р. Мантурихе (с минимальным). Относительная ошибка определения концентрации основных ионов не превышает точности их определения.

Так, для Ca^{2+} она была 2,6 %, Mg^{2+} - 2,7, SO_4^{2-} - 3,0, Cl^- - 3,2, для суммы ионов - 5,7 %.

Изменчивость содержания компонентов ионного состава в водах Байкала анализировалась как по опубликованным материалам /Вотинцев, 1961; Вотинцев, Глазунов, 1963; Глазунов, 1963; Вотинцев и др., 1965/, так и по собственным наблюдениям. Пробы воды на глубоководных станциях (см. рис. 1) отбирались ежемесячно, за исключением тех периодов, когда состояние ледового покрова не позволяло проводить работы с горизонтов 0, 5, 10, 25, 50, 100 м и далее через каждые 100 м до дна.

Для исследования процесса возможного эвтрофирования озера проводились определения взвешенного вещества, хлорофилла "а", всех форм N (аммонийный, нитритный, нитратный и органический) и P (ортофосфаты и органический), $\text{C}_{\text{орг}}$, причем C, N и P определялись как в нефилтрованной воде, так и во взвеси.

На глубоководных станциях озера горизонты отбора проб воды те же, что описаны нами выше. Следует отметить, что до горизонтов 500-700 м пробы воды отбирались в дневное время.

Анализы вышеперечисленных компонентов проведены по стандартным методам, общепринятым в гидрохимической практике и подробно описанным нами /Тарасова, 1975/, точность их довольно высока (5-7 %). Для установления же возможной ошибки при отборе проб на одной станции в водах озера в силу микромасштабных изменений проведен отбор проб воды на сетке станций, расположенных в 0, 5; 1, 0; 1, 5 и 3, 0 км от исследованной точки на север, юг, запад и восток по сезонам года; в марте - на одной станции ежедневно в течение нескольких дней (табл. 1, 2). Суточные изменения коэффициентов вариации исследуемых компонентов представлены в табл. 3, 4.

Ввиду неравномерности распределения фитопланктона по вертикали возможна ошибка при взятии проб воды со стандартных горизонтов, для чего было рассчитано средневзвешенное содержание компонентов в слое 0-25 м по стандартным (0, 5, 10, 25 м) и более дробным (0; 2, 5; 5; 7, 5; 10; 15; 20; 25 м) горизонтам (табл. 5). Коэффициенты корреляции для всех исследуемых компонентов значительно ниже точности их измерений (см. табл. 3, 4), а отбор пробы воды по стандартным горизонтам не вносит ошибку в расчет средневзвешенных концентраций (табл. 5).

Непродолжительность рейсов (от 1 до 2 дней) на Байкале и устойчивость аллохтонного органического вещества в реках (по результатам исследований Б. А. Скопинцева /1948/ в первые 2 нед взвешенное аллохтонное вещество теряет лишь единицы процентов азота и фосфора) позволили провести все анализы непосредственно в лаборатории в течение 3-4 дней.

Эксперименты по соотношению лабильной и трудноразлагаемой фракций азот- и фосфорсодержащих органических веществ в эоловой взвеси отмершего фитопланктона и сточных водах проводили по схеме Зобелла /1946/, в холодильнике (4-9 °C), перемешивание воды осуществлялось аквариумным микрокомпрессором (воздух

Таблица 1. Содержание биогенных элементов в зависимости от места взятия проб в 1988 г., мг/л

Глубина, м	Расстояние и направление от центральной точки, км															
	на север				на юг				на запад				на восток			
	0,5	1,0	1,5	3,0	0,5	1,0	1,5	3,0	0,5	1,0	1,5	3,0	0,5	1,0	1,5	3,0
Май																
Р - PO ₄ ³⁻																
0	10	10	11	11	11	10	10	10	10	10	10	10	10	11	10	10
2,5	10	10	11	10	10	12	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
5	10	10	10	11	10	10	10	10	11	10	10	10	10	10	10	10
10	10	10	10	10	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
50	11	12	10	12	10	10	11	10	13	11	12	11	11	12	12	11
Р общ																
0	22	21	22	21	22	20	21	21	22	20	21	21	20	20	21	22
2,5	-	20	-	21	20	21	21	21	21	21	20	21	22	19	20	20
5	21	20	20	21	20	21	20	21	21	-	20	20	20	20	-	20
10	21	20	21	20	21	21	20	-	21	21	21	20	20	-	21	22
50	21	21	20	21	20	20	21	21	21	22	20	20	21	21	21	22
N - NO ₃ ⁻																
0	54	54	45	46	54	54	45	54	54	44	44	45	54	45	48	-
2,5	59	63	63	54	61	57	57	51	51	51	55	56	48	52	54	-
5	54	54	54	54	54	54	55	58	58	58	58	58	54	60	58	-
10	77	72	68	77	77	77	77	81	72	72	72	72	68	68	68	-
50	90	86	90	87	87	64	84	90	85	87	87	87	81	81	81	-
Июль																
Р - PO ₄ ³⁻																
0	13	12	12	12	13	12	13	12	13	12	13	13	13	13	13	13
2,5	12	12	12	12	13	13	13	13	13	12	13	13	13	14	14	14
5	14	13	41	13	14	15	15	15	-	15	16	16	16	13	14	14
10	15	14	14	14	15	15	15	14	15	15	16	15	15	15	14	14
50	15	13	14	13	14	15	15	14	15	15	16	15	15	15	14	14
N - NO ₃ ⁻																
0	22	20	21	21	21	22	22	22	22	21	22	22	21	21	22	22
2,5	23	22	21	22	22	20	21	22	22	22	22	22	22	21	21	22
5	23	22	22	22	23	23	21	22	22	23	23	24	23	24	23	23
10	23	22	23	22	23	23	21	22	23	24	24	24	23	23	24	24
50	23	22	24	21	22	22	23	23	22	23	22	23	23	23	24	26
Июль																
Р - PO ₄ ³⁻																
0	45	41	48	48	41	43	45	48	48	43	46	41	48	50	43	43
2,5	46	41	45	42	41	43	43	43	51	50	54	41	48	50	50	48
5	50	50	50	48	48	-	43	48	48	43	49	44	50	49	50	48
10	50	46	45	48	46	46	49	43	48	46	49	50	50	50	50	48
50	49	46	49	50	56	43	52	48	48	50	52	48	50	50	48	48
Июль																
Р - PO ₄ ³⁻																
0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2,5	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3
50	9	9	9	9	10	9	10	-	-	9	9	10	9	10	9	9
Июль																
Р общ																
0	13	13	13	12	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
2,5	14	13	-	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
5	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
10	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
50	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Июль																
N - NO ₃ ⁻																
0	14	16	16	16	61	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
2,5	13	14	14	14	14	14	14	14	14	16	14	14	14	14	16	16
5	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	18
10	18	19	22	22	19	19	19	20	22	19	19	19	19	22	19	22
50	68	68	68	63	63	68	70	65	64	63	63	63	63	59	63	59

Таблица 2. Содержание биогенных элементов в зависимости от времени взятия проб в марте 1988 г., мкг/л

Глубина, м	Число месяца									
	20	24	25	26	27	28	29	30		
0	88	90	N - NO ₃ ⁻ 81	81	79	81	81	79		
2,5	90	86	86	86	84	81	86	81		
5	90	88	81	86	86	86	86	86		
10	95	88	86	86	86	93	86	86		
50	99	99	93	93	95	93	86	93		
0			P - PO ₄ ³⁻ 8	8	8	8	9	9		
2,5	9	9	9	10	9	9	9	9		
5	10	10	10	10	10	10	10	10		
10	10	10	10	10	10	10	9	9		
50	12	12	12	12	12	12	11	12		
0			P _{общ} 17	16	16	17	19	19		
2,5	15	18	16	16	19	16	19	18		
5	16	18	16	17	19	17	18	19		
10	17	18	18	18	19	18	18	18		
50	16	16	18	18	19	19	19	19		

Таблица 3. Коэффициенты вариации биогенных элементов в различных местах глубоководной части Байкала в 1988 г., %

Время взятия проб	Горизонт, м				
	0	2,5	5	10	50
N - NO ₃ ⁻					
Март	5	3	3	4	4
Май	8	8	4	5	5
Июнь	6	9	5	4	6
Июль	3	6	4	7	5
P _{общ}					
Март	5	8	6	2	7
Май	3	3	3	3	3
Июнь	3	3	3	4	4
Июль	2	2	3	0	0
P - PO ₄ ³⁻					
Март	6	3	5	4	3
Май	4	6	3	2	8
Июнь	4	5	7	4	7
Июль	7	7	7	7	6

Примечание. В марте пробы отобраны ежедневно на одной станции в открытой части озера с 23 по 29, в остальное время - от центральной точки на расстоянии 0, 5; 1, 0; 1, 5 и 3, 0 км на север, юг, запад и восток.

очищался от NH₄⁺ и CO₂). О правильности постановки экспериментов судили по сохранению баланса азота и фосфора (по сумме их взвешенных и растворенных форм) в течение всего эксперимента.

Погрешность определения концентрации органического вещества и биогенных элементов в притоках озера оценивалась как описано нами выше для основных ионов, и она составляла: для ОВ - до 11,1 %, SiO₂ - до 8,4, N-NO₃⁻ - до 11,2, P-PO₄³⁻ - до 5,2, N_{орг} - до 20, P_{орг} - до 18 %.

Для определения элементного состава органического вещества фитопланктона он отлавливался тралением планктонной сетью, на месте высушивался или замораживался. Содержание фосфора в нем, как и во взвешенном веществе, определялось по методике Colterman /1969/, что позволило повысить чувствительность метода до 0,1 мкг P/л.

Таблица 4. Суточные изменения коэффициентов вариации для взвеси, органического вещества и биогенных элементов в сентябре 1975 г. и в 1976 г., %

Время взятия проб	Горизонт, м									
	0	2	5	10	15	20	25	50	100	250
Взвесь										
Сентябрь	3	2	3	4	8	3	3	2	4	4
Март	2	2	4	2	2	4	2	2	3	4
Май	6	3	3	2	3	3	7	3	5	2
Июль-август	2	1	1	2	1	2	1	3	2	2
N - NO ₃ ⁻										
Сентябрь	3	4	3	1	1	1	2	6	2	5
Март	2	2	2	2	2	3	2	2	2	1
Май	4	7	7	7	7	6	9	9	12	12
Июль-август	2	2	2	9	3	2	3	2	7	2
P - PO ₄ ³⁻										
Сентябрь	0	0	0	1	2	5	2	2	2	2
Март	4	3	0	-	-	-	-	0	3	3
Май	3	3	2	1	2	2	2	2	2	2
Июль-август	1	1	2	2	2	4	3	3	2	4
Бихроматная окисляемость										
Сентябрь	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Март	2	2	-	-	-	-	-	-	-	1
Перманганатная окисляемость										
Сентябрь	1	2	1	-	-	-	-	1	1	1
Май	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2
Июль-август	6	1	2	1	1	2	2	4	1	1
C _{орг}										
Сентябрь	2	2	2	2	1	1	1	2	1	1
Май	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
Июль-август	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
P _{орг}										
Сентябрь	3	4	3	3	3	3	3	2	2	2
Май	6	6	6	4	3	3	3	2	2	2
N _{орг}										
Сентябрь	3	3	3	4	4	2	2	2	2	2
Май	6	6	6	6	4	4	3	3	2	2

Таблица 5. Средневзвешенные значения некоторых химических компонентов в слое 0-25 м в июле-августе 1987 г.

Таблица 5. Средневзвешенные значения некоторых химических компонентов в слое 0-10 м																
Место взятия проб	Взвесь, мг/л		Хлорофилл "a"	P-PO ₄ ³⁻		P _{орг}		N-NO ₃ ⁻		N _{орг}		SiO ₂		Перманганатная окисляемость		
	мкг/л										мг/л					
	1	2		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2			
Маритуга - Солзан	0,73	0,77	3,0	2,79	4	4	12	13	49	45	110	108	1,24	1,28	1,51	1,53
Половинка - Мурзино	0,72	0,72	1,69	1,66	5	6	19	19	70	68	139	143	1,96	2,00	1,62	1,58
Капильный - Мишиха	1,30	1,31	1,74	1,82	4	4	15	14	37	36	160	164	4,12	4,16	1,90	1,85
Ухан - Тонкий	0,50	0,46	0,92	0,89	7	7	12	12	44	44	120	114	3,80	3,74	1,35	1,32
Покойники - Св. Нос	0,98	1,03	3,52	3,55	5	4	14	15	32	35	160	170	3,08	3,10	1,67	1,62
Елохин - Давша	1,70	1,77	2,40	2,32	4	5	10	10	31	29	108	119	3,24	3,32	1,77	1,76
Байкальское - Туран	0,70	0,65	0,56	0,56	7	7	3	3	71	69	108	107	4,12	4,12	0,99	0,98
... значения проб: 1 - с 0; 5: 10; 25 м; 2 - с 0; 2, 5;																

Примечание. Рассчитано по значениям, определенным при взятии проб: 1 - с 0; 5; 10; 25 м; 2 - с 0; 2, 5; 5; 10; 12, 5; 15; 20 и 25 м.

Характер и особенности режима основных ионов в водах притоков озера за последние годы остались прежними, поэтому, кратко описав содержание, динамику компонентов ионного состава рек, подробно изложенную в работе К. К. Вотинцева, И. В. Глазунова, А. П. Толмачевой /1965/, остановимся на тех изменениях, что произошли в их содержании.

Главнейшим компонентом анионного состава воды притоков Байкала являются гидрокарбонаты, на долю которых приходится обычно 75–90 % экв. ионов. Сульфатный ион составляет 8–15 % экв. ионов, хлоридный – не выше 2, 5–3, 5 % экв. ионов.

Из катионов главную массу составляет кальций – до 60–75 % экв. ионов. Доля магния невелика – 10–20 % экв. ионов. Содержание ионов щелочных металлов около 9 % экв. ионов.

Воды главнейших (Селенга, Баргузин, Верх. Ангара) и большого числа малых притоков озера относятся к первому типу гидрокарбонатно-кальциевых вод по классификации О. А. Алекина:

$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. Ко второму типу гидрокарбонатно-кальциевых вод ($\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$) относятся воды рек,

стекающих с хр. Хамар-Дабан в юго-западную часть озера; некоторых притоков северо-восточного побережья, формирующихся на Баргузинском хребте; многих притоков, впадающих в Байкал на его северо-западном побережье.

У значительного числа малых притоков и у некоторых более крупных рек наблюдаются кратковременные изменения типа воды, в целом связанные с характером питания реки и чаще всего приуроченные к периодам паводков. На некоторых притоках – Рель, Слюдянка (Северная), Томпуда, Выдриная, Хара-Мурин и др. – наблюдаются и более глубокие изменения обычных соотношений ионов, приводящие к временному переходу их вод из одной гидрохимической группы в другую.

По степени минерализации воды притоки Байкала могут быть разделены на пять групп /Вотинцев и др., 1965/.

1. Притоки с очень низкой минерализацией воды располагаются преимущественно в южной и северной оконечностях Байкала и имеют, как правило, небольшие водосборные бассейны, в строении

которых принимают участие слабывщелачиваемые кристаллические породы. Уклоны в этих бассейнах в основном весьма значительны. Питание рек преимущественно поверхностное, главным образом снеговое. Зимой они обычно перемерзают или имеют крайне незначительные расходы воды. Минерализация (по сумме ионов) в водах указанной группы не превышает 50 мг/л, летом она часто еще ниже (20–40 мг/л).

2. Притоки с минерализацией воды 50–100 мг/л – многочисленные горные речки, собирающие свои воды в непосредственной близости от Байкала с примыкающих к нему горных хребтов. Сюда относятся также Верх. Ангара и Турка, бассейны которых выходят за пределы прибрежных хребтов озера.

3. Притоки с минерализацией воды от 100 до 200 мг/л – Селенга, Баргузин, Голоустная и Томпа. Сравнительно невысокая минерализация наиболее крупных рек этой группы в значительной степени обусловлена геологическим строением их бассейнов, сложенных кристаллическими породами.

4. Притоки с минерализацией воды 200–300 мг/л немногочисленны, находятся в областях развития карбонатных пород, обеспечивающих высокую минерализацию. Однако в связи с горным характером и небольшой площадью бассейнов эти ручьи и речки быстро скатывают свои воды в Байкал, не успевая значительно повысить свою минерализацию.

5. Притоки с очень высокой минерализацией воды (300–400 мг/л), к которым относится р. Бол. Бугульдейка. Ее бассейн сложен карбонатными породами, обеспечивающими высокую минерализацию воды – до 300 мг/л летом и до 350–400 мг/л зимой. К этой же группе относятся несколько ручьев о. Спльхон, питающихся водами глубинных горизонтов с более высокой минерализацией.

По характеру сезонных изменений минерализации воды притоки озера группируются в пять типов /Вотинцев и др., 1965/.

Первый тип, соответствующий сибирскому типу гидрохимического режима рек по классификации О. А. Алекина, характеризуется резким снижением минерализации воды в период весеннего паводка и сохранением минимальных значений в течение всего теплого времени года. К рекам этого типа относятся Сарма, Давша, Хара-Мурин, Утулик и др. (рис. 2).

Второй тип, соответствующий казахстанскому типу по классификации О. А. Алекина /1970/, также характеризуется снижением минерализации воды до годового минимума весной, повышением ее в период летней межени, последующим снижением во время летне-осеннего паводка и плавным повышением в течение остальной части года. К рекам этого типа относятся Селенга, Чихой, Джида, Турка и некоторые другие (см. рис. 2).

Третий тип, по упомянутой классификации (восточно-европейский), характеризуется резким кратковременным снижением минерализации воды в период весеннего паводка с последующим быстрым значительным ее повышением и относительным постоянством в

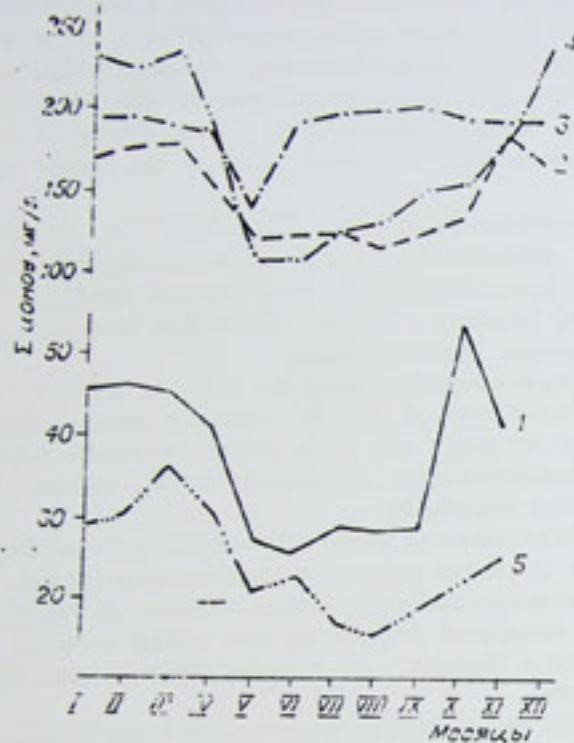


Рис. 2. Сезонные изменения общей минерализации воды в реках с различным типом гидрохимического режима.

1 — р. Хара-Мури, первый тип; 2 — р. Селенга, второй тип; 3 — руч. Харгино, третий тип; 4 — р. Голоустная, четвертый тип; 5 — р. Рель, пятый тип.

остальные месяцы года. Из притоков Байкала к нему относятся речки Крестовка (у пос. Листвянка) и Харгино (см. рис. 2).

Четвертый тип гидрохимического режима рек характеризуется довольно быстрым и значительным снижением минерализации воды весной с последующим

плавным возрастанием ее в течение всего летне-осеннего времени. Наиболее ярко он выражен в реках Голоустная, Снежная, Половинная, отчетливо проявляется также в реках Тья, Томпуда, Баргузин. Этот тип, ранее не описанный для территории СССР, назван К. К. Вотинцевым /1961/ байкальским (см. рис. 2).

Пятый тип гидрохимического режима рек известен пока лишь для р. Рель. Он характеризуется значительным снижением общей минерализации воды с начала весны (март) до сентября, когда она приходит к годовому минимуму. От мая к июню наблюдается небольшое увеличение минерализации, совпадающее по времени с максимумом расходов воды в реке. Тип этот описан на территории СССР впервые и назван конденсационным (см. рис. 2). Он обусловлен значительной долей в водном стоке реки конденсирующихся паров воды в ночные часы на многочисленных скальных обнажениях в долине реки. Вероятно этот тип режима распространен более широко в малых горных речках и ручьях, стекающих в Байкал, особенно в северной части озера /Вотинцев, 1965/.

Внутригодовые изменения минерализации воды на большей части бассейна Байкала не превышают 1,5–2,5 раза.

Сезонные изменения содержания отдельных гидрохимических компонентов в водах притоков Байкала могут быть охарактеризованы следующим образом.

Содержание гидрокарбонатов наибольшее в конце подледного периода и наименьшее в периоды паводков.

Сезонные изменения содержания сульфатов в ряде рек (Баргузин, Бол. Голоустная и др.) в общем соответствует изменчивости гидрокарбонатов. В то же время в других реках наблюдается существенное увеличение концентрации сульфатов в периоды паводков, причем в отдельных случаях оно бывает настолько значительным (в Селенге в августе до 18 мг/л), что превышает максимальные значения, отмечаемые зимой (в марте в Селенге 13,0 мг/л). По всей вероятности, это связано со смывом в периоды дождей выветов солей со степных участков почвы, наиболее широко развитых в Забайкалье.

Хлориды, содержание которых в речных водах незначительно, не имеют четко выраженных сезонных изменений, хотя в целом сохраняют общую тенденцию, характерную для главных ионов.

За последние 20–30 лет особенно значительное увеличение сульфатов и хлоридов произошло в р. Селенге (соответственно на 42 и 21 %) и в реках Южного Байкала (табл. 6, 7).

Сезонные изменения содержания кальция обычно аналогичны колебаниям гидрокарбонатов и минерализации воды. Количество магния в реках, где его концентрация достаточно велика, также имеет обычный сезонный ход. В маломинерализованных водах рек, где концентрация этого компонента невелика, характер ее сезонных изменений хотя и сохраняется, но выражен менее отчетливо.

На многих реках бассейна озера сезонные изменения содержания щелочных металлов (суммы натрия и калия) характеризуются повышением их концентраций в периоды паводков. На одних реках это относится только к весенним паводкам (Мантуриха, Мал. Голоустная, Тья), на других — к летним дождевым паводкам (Голоустная, Томпуда, Большая (Северная), Баргузин); на некоторых притоках (Куралда, Чикой) повышенные концентрации щелочных металлов наблюдаются как при весенних, так и при летних дождевых паводках. В отдельных случаях в период паводков содержание этих компонентов превышает максимальные зимние. Такой характер сезонных изменений содержания щелочных металлов указывает на то, что одним из главных источников их поступления в речные воды являются почвогрунты, откуда они вымываются весной талыми, а летом дождевыми водами.

Газовый режим притоков Байкала характеризуется близким к нормальному насыщению содержанием растворенного кислорода (O_2) и низким содержанием свободного диоксида углерода (CO_2 свобод) в безледный период и значительным снижением содержания кислорода и повышением содержания свободной CO_2 к концу ледостава. Даже Селенга к концу зимы несет воды с содержанием кислорода всего около 40–50 % насыщения, содержание же свободной CO_2 в ее водах возрастает в этот период до 16–20 мг/л.

Только в некоторых реках с бурным течением, имеющих незамерзающие зимой участки (потоки, "пропарины"), газовый режим остается в течение всего года вполне благоприятным для

Таблица 6. Средневзвешенный по стоку химический состав вод притоков оз. Байкал в 1950-1955 гг., мг/л

Река	$\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	ОВ	$\text{Fe}_{\text{общ}}$	SiO_2	Сумма ионов
Голоустная	81,28	14,28	0,66	19,69	6,27	3,64	13,73	0,28	9,87	126
Бол. Бугульдейка	199,35	21,73	0,60	44,13	16,89	3,57	10,83	0,35	10,24	287
Сарма	51,04	7,85	0,58	11,89	3,39	3,55	16,04	0,18	8,98	79
Рель	13,70	0,73	0,14	2,50	0,70	1,59	5,02	0,13	5,49	20
Тья	45,04	5,24	0,42	11,09	2,57	2,30	5,92	0,02	5,89	67
Верх. Ангара	57,34	3,70	0,27	14,90	2,06	2,65	5,04	0,15	6,41	81
Томпуда	70,57	8,84	0,49	20,82	3,03	3,67	4,41	0,09	6,41	107
Давша	61,58	4,37	0,37	15,10	1,56	5,29	9,10	0,10	12,86	89
Баргузин	89,22	7,90	1,06	24,04	2,74	5,52	8,15	0,30	9,13	131
Турка	36,06	3,14	0,62	8,55	1,40	3,27	6,48	0,23	11,96	54
Бол. Сухая	38,98	2,94	0,15	8,56	1,41	3,89	4,32	0,04	12,20	56
Селенга	88,67	6,50	1,23	20,69	4,55	5,17	10,62	0,89	11,58	127
Мантуриха	43,68	3,14	0,29	10,66	1,23	3,64	6,93	0,18	13,30	63
Мысовая	36,61	2,41	0,18	8,58	1,05	3,35	5,63	0,07	13,89	52
Снежная	41,30	3,81	0,10	6,89	0,85	2,12	7,11	0,34	7,86	48
Хара-Мурин	18,21	4,04	0,18	4,72	0,77	2,26	7,70	0,04	8,37	31
Утулик	40,50	7,31	0,13	11,45	1,86	2,82	5,92	0,03	9,22	66
Половинная	34,15	3,41	0,46	6,99	1,55	4,13	14,96	0,58	13,22	51
В среднем по 18 притокам	75,78	5,93	0,90	18,39	3,53	4,37	8,82	0,59	9,98	109
В среднем по всем притокам	74,60	5,98	0,78	18,18	3,23	4,66	9,59	0,48	10,30	108

Таблица 7. Средневзвешенный по стоку химический состав вод притоков оз. Байкал в 1970, 1971, 1981-1984 гг., мг/л

Река	$\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	ОВ	$\text{Fe}_{\text{общ}}$	SiO_2	Сумма ионов
Голоустная	79,38	14,23	0,76	0,21	0,014	19,93	6,87	1,27	28,18	1,10	12,03	123
Бол. Бугульдейка	234,50	23,91	1,16	0,65	0,014	50,0	21,74	2,90	19,57	0,44	12,54	338
Рель	18,06	2,43	0,25	0,31	0,012	5,11	0,46	1,35	4,92	0,16	4,46	28
Тья	41,72	4,69	0,34	0,30	0,009	10,31	2,68	1,41	5,39	0,08	5,47	61
Верх. Ангара	49,89	4,48	0,35	0,25	0,010	13,01	2,12	2,61	8,81	0,54	7,95	73
Томпуда	60,28	8,16	0,35	0,44	0,013	18,33	2,38	1,91	4,44	0,32	5,46	92
Баргузин	83,10	7,34	0,58	0,30	0,020	23,00	2,54	4,42	11,59	0,45	9,01	121
Турка	31,97	3,69	0,48	0,20	0,010	7,13	1,31	3,31	9,82	0,36	9,55	48
Бол. Сухая	32,92	3,21	0,29	0,22	0,022	7,01	1,31	3,87	5,77	0,11	10,15	49
Селенга	93,26	9,25	1,49	0,25	0,030	21,98	4,69	6,91	15,17	0,49	11,84	138
Мантуриха	36,59	4,32	0,44	0,09	0,013	9,46	1,74	2,24	7,57	0,63	11,10	55
Мысовая	33,60	3,68	0,44	0,18	0,009	8,51	1,49	2,28	6,84	0,33	10,679	50
Снежная	25,35	4,00	0,34	0,48	0,009	7,59	0,97	1,26	8,00	0,45	6,53	40
Хара-Мурин	13,00	3,30	0,21	0,33	0,006	3,60	0,67	1,11	8,00	0,12	6,30	22
Утулик	37,96	7,12	0,35	0,89	0,007	11,13	2,12	1,75	9,12	0,24	8,21	61
Половинная	32,89	6,39	0,62	0,21	0,021	6,60	1,96	4,02	17,84	1,14	13,71	53
В среднем по 16 притокам...	75,27	7,57	1,02	0,28	0,021	18,43	3,59	5,08	12,55	0,44	10,15	111
В среднем по всем притокам...	71,64	7,52	0,93	0,28	0,018	17,54	3,61	4,58	12,22	0,44	9,95	106

обитающих в них гидробионтов. Так, содержание кислорода в р. Бол. Речка, впадающей в Посольский Сор, зимой (в феврале-марте) не опускается ниже 85-90 %, а свободной CO_2 не поднимается выше 5-8 мг/л /Вотинцев и др., 1965/.

pH воды изменяется обычно в соответствии с сезонными колебаниями свободной CO_2 . В целом они чаще лежат в нейтрально-щелочной области (pH 7, 0-8, 2).

Воды притоков очень сильно разнятся по количеству водной взвеси: выше 25, 0 мг/л (среднегодовая) имеют Селенга, от 15, 0 до 25 мг/л - Бугульдейка и Тья, от 5, 0 до 15, 0 мг/л - Голоустная, Баргузин, Верх. Ангара, Утулик, Снежная, Сухая, Томпа и Мысовая, до 5, 0 мг/л и меньше - Мурино, Кичера, Турка, Мантуриха и Рель. Высокому количеству взвешенного материала в притоках, как правило, соответствует и высокая цветность их вод. Для большинства рек максимальное количество водной взвеси приходится на июль, в водах Бугульдейки, Тьи и Томпы - на июнь. Для вод Половинной, Баргузина, Рели, Сухой Голоустной, Мысовой и Мантурихи отчетливо выражены два максимума, приходящиеся, как правило, на июнь и август. Амплитуда сезонных колебаний концентрации взвеси наибольшая в Селенге (85, 5 мг/л), наименьшая в Рели (1, 8 мг/л). Взвешенное вещество состоит на 55 % из фракции менее 0, 01 мм, на 40 % - 0, 08-0, 01 мм и только 5 % представлено частицами 0, 14-0, 08 мм.

Глава III

ХИМИЧЕСКИЙ БАЛАНС БАЙКАЛА И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НА НЕГО ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Воды Байкала формируются за счет вод притоков озера и атмосферных осадков, выпадающих на его зеркало /Афанасьев, 1960, 1976/. В водном балансе озера годовой дебит атмосферных осадков составляет, по данным А.Н. Афанасьева, всего 13 %.

В химическом балансе Байкала воды атмосферных осадков составляют еще меньшую долю. По сумме ионов они достигают всего 1, 4 % /Вотинцев, 1961/.

Результаты определения выноса в Байкал химических веществ с водами рек в 1950-1955 гг. и в 1970, 1971, 1981-1984 гг. приведены соответственно в табл. 8 и 9.

В ионном стоке основную массу (68 % от общего количества ионов) составляли гидрокарбонатные ионы. Кальция поступило 17 %, остальных ионов (Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} и Cl^-) - 15 %.

Средний годовой сток основных притоков за исследованный период составил 5, 65 млн т, превысив на 10 % соответствующий показатель за 50-е годы. На долю нитратного азота и фосфатного фосфора приходится всего 0, 2 %.

Таблица 8. Количество растворенных веществ ($\cdot 10^3$ т/год), поступающих в оз. Байкал с водами основных притоков в 1950-1955 гг.

Река	$\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	ОВ	$\text{Fe}_{\text{общ}}$	SiO_2	Сумма ионов
Голоустная	23	4,0	0,19	5,5	1,76	1,02	3,85	0,778	2,8	35,5
Бол. Бугульдейка	23	2,48	0,07	5,0	1,92	0,41	1,23	0,040	1,17	33,0
Сарма	8	1,17	0,09	1,8	0,51	0,53	2,39	0,028	1,34	12,2
Рель	5	0,26	0,05	0,9	0,25	0,57	1,80	0,046	2,0	7,2
Тья	55	6,3	0,51	13,4	3,1	2,78	7,2	0,03	7,1	81
Верх. Ангара	475	30,6	2,27	123	17,1	21,9	41,7	1,22	53	672
Томпуда	64	8,0	0,44	18,8	1,83	3,32	4,0	0,08	5,8	97
Давша	1	0,10	0,01	0,3	0,03	0,12	0,20	0,002	0,29	1,6
Баргузин	341	30,2	4,05	92	10,5	21,1	31,1	1,15	35	500
Турка	51	4,5	0,87	12,1	2,0	4,6	9,2	0,33	16,9	76
Бол. Сухая	4	0,27	0,01	0,8	0,13	0,36	0,40	0,000	1,13	5,6
Селенга	2399	176	33,2	560	123	140	287	24,1	313	3444
Мантуриха	10	0,72	0,07	2,5	0,28	0,84	1,60	0,041	3,1	14,5
Мысовая	3	0,22	0,02	0,8	0,10	0,31	0,52	0,007	1,28	4,5
Снежная	43	5,3	0,13	12,3	1,17	2,93	9,8	0,47	10,9	66
Хара-Мурино	14	3,0	0,13	3,5	0,58	1,70	5,8	0,028	6,3	23,4
Утулик	19	3,4	0,06	5,3	0,86	1,31	2,75	0,016	4,3	30,8
Половинная	3	0,26	0,03	0,5	0,12	0,32	1,14	0,045	1,01	4,3
Всего для 18 рек...	3539	266	42,2	859	165	204	412	27,7	466	5106

Таблица 9. Количество растворенных веществ ($\cdot 10^3$ т/год), поступающих в оз. Байкал с водами основных притоков в 1970, 1971, 1981-1984 гг.

Река	Водный сток, км ³ /год	HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	OB	Fe _{общ}	SiO ₂	Сумма ионов
Селенга	28,8	2686	266,4	43,0	7,30	0,76	633	135	199	437	12,4	341	3970
Верх. Ангара	9,20	459	41,2	3,18	2,26	0,13	119,7	19,5	24,0	81,1	5,0	73,1	669
Баргузин	4,14	344	30,4	2,41	1,26	0,09	95,2	10,5	18,3	48,0	1,85	37,3	502
Турка	1,57	50,2	5,8	0,76	0,32	0,02	11,2	2,05	5,2	15,1	0,56	15,0	75,6
Снежная	1,70	43,1	6,8	0,57	0,81	0,015	12,9	1,65	2,15	13,6	0,76	11,1	68,0
Тыя	1,28	53,4	6,0	0,44	0,38	0,011	13,2	3,43	1,87	6,9	0,10	7,0	78,7
Томпуда	1,08	65,1	8,8	0,38	0,47	0,014	19,8	2,57	2,06	4,8	0,35	5,9	99,2
Хара-Мурин	1,00	13,0	3,3	0,21	0,33	0,006	3,6	0,67	1,11	8,0	0,12	6,3	22,2
Утулик	0,548	20,8	3,9	0,19	0,49	0,004	6,1	1,16	0,96	5,0	0,13	4,5	23,6
Рель	0,325	5,87	0,79	0,08	0,10	0,004	1,7	0,15	0,44	1,6	0,053	1,45	9,1
Голоустная	0,291	23,10	4,14	0,22	0,06	0,004	5,8	2,00	0,37	8,2	0,320	3,50	35,7
Мангуриха	0,317	11,57	1,37	0,14	0,03	0,004	3,0	0,55	0,71	2,4	0,200	3,52	17,4
Бол. Бутуль-дейка	0,138	32,56	3,30	0,16	0,09	0,002	6,9	3,00	0,40	2,7	0,061	1,73	46,3
Бол. Сухая	0,137	4,51	0,44	0,04	0,03	0,003	0,96	0,18	0,53	0,79	0,015	1,39	6,7
Мысовая	0,114	3,83	0,42	0,05	0,02	0,001	0,97	0,17	0,26	0,78	0,038	1,23	5,7
Половинная	0,097	3,19	0,62	0,06	0,02	0,002	0,64	0,19	0,39	1,73	0,112	1,33	5,1
Всего для 16 рек...	50,74	3820	384	51,9	13,9	1,06	936	182	258	638	22,1	515	5650

Сезонные изменения ионного стока зависят в первую очередь от сезонных изменений водности рек. В среднем в безледоставный период в Байкал поступает 78-84 % годового количества ионов и около 85 % кремния. Сроки максимального стока гидрохимических компонентов и максимума водности рек совпадают за небольшим исключением. Однако вследствие различий в минерализации воды химический сток отдельных рек не всегда строго пропорционален стоку воды. Так, хотя средний объем стока Томпуды и Хара-Мурин практически одинаков (1,08-1,00 км³/год), ионный сток первой из них в 4,5 раза выше. Сток Верх. Ангарты превышает сток Баргузин в 2,2 раза, в то же время ионный сток превышает сток соответственно всего на 33 %.

По сравнению с 50-ми годами в исследуемый период увеличился сток сульфатов, хлоридов, органического вещества.

Основная роль в увеличении притока в озеро названных веществ принадлежит Селенге и Верх. Ангарте, со стоком которых в Байкал поступает 2/3 сульфатов, более 80 % хлоридов и примерно 70 % органического вещества от общего поступления этих веществ с речными водами. Изменение химического стока по сравнению с 50-ми годами в значительной степени обусловлено увеличением концентрации в речных водах ряда компонентов. Так, в Селенге и Верх. Ангарте при увеличении стока воды соответственно на 2 и 17 % сток сульфатов возрос на 51 и 35 %, хлоридов - на 29 и 40 %, OB - на 52 и 94 %. Существенно возросло поступление указанных компонентов из притоков Южного Байкала, хотя их водность увеличилась по сравнению с 50-ми годами в основном лишь на 10-15 %. Так, сток сульфатов в реках Мысовая и Мангуриха увеличился в 1,9 раза, в Половинной - в 2,4, хлоридов в Снежной и Бол. Сухой - соответственно в 4,4 и 4, в Мангурихе и Мысовой - в 2,0 и 2,5 раза.

Доля атмосферной составляющей от речного ионного стока в химическом балансе Байкала увеличилась от 1,5 % в 50-х годах до 5,0 % в 1976-1984 гг. /Вотинцев и др., 1983/. Особенно возросло поступление на акваторию озера SO₄²⁻, Cl⁻, Na⁺, NH₄⁺, PO₄³⁻ и Si.

Основная часть расхода веществ (сток с водами Ангарты) практически не изменилась за сравниваемые периоды (табл. 10, 11).

Следует отметить, что, как и в 50-х годах, ряд химических компонентов поступает в Байкал в количествах, значительно превышающих их вынос из озера. К. К. Вотинцевым /1961/ показано, что кремний выводится из круговорота в водной толще Байкала в результате его потребления диатомовыми водорослями и отчасти губками с последующим увеличением в донные отложения в форме створок этих водорослей и спикул губок и захоронением здесь.

Общее количество железа, подвергающееся седиментации, близко к 25 тыс. т (в 1950 г. 30 тыс. т). По данным

Таблица 9. Количество растворенных веществ ($\cdot 10^3$ т/год), поступающих в оз. Байкал с водами основных притоков в 1970, 1971, 1981-1984 гг.

Река	Водный сток, км ³ /год	HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	OB	Fe _{общ}	SiO ₂	Сумма ионов
Селенга	28,8	2686	266,4	43,0	7,30	0,76	633	135	199	437	12,4	341	3970
Верх. Ангара	9,20	459	41,2	3,18	2,26	0,13	119,7	19,5	24,0	81,1	5,0	73,1	669
Баргузин	4,14	344	30,4	2,41	1,26	0,09	95,2	10,5	18,3	48,0	1,85	37,3	502
Турка	1,57	50,2	5,8	0,76	0,32	0,02	11,2	2,05	5,2	15,1	0,56	15,0	75,6
Снежная	1,70	43,1	6,8	0,57	0,81	0,015	12,9	1,65	2,15	13,6	0,76	11,1	68,0
Тыя	1,28	53,4	6,0	0,44	0,38	0,011	12,2	3,43	1,87	6,9	0,10	7,0	78,7
Томпуда	1,08	65,1	8,8	0,38	0,47	0,014	19,8	2,57	2,06	4,8	0,35	5,9	99,2
Хара-Мурин	1,00	13,0	3,3	0,21	0,33	0,006	3,6	0,67	1,11	8,0	0,12	6,3	22,2
Утулик	0,548	20,8	3,9	0,19	0,49	0,004	6,1	1,16	0,96	5,0	0,13	4,5	23,6
Рель	0,325	5,87	0,79	0,08	0,10	0,004	1,7	0,15	0,44	1,6	0,053	1,45	9,1
Голоустная	0,291	23,10	4,14	0,22	0,06	0,004	5,8	2,00	0,37	8,2	0,320	3,50	35,7
Мангуриха	0,317	11,57	1,37	0,14	0,03	0,004	3,0	0,55	0,71	2,4	0,200	3,52	17,4
Бол. Бутуль-дейка	0,138	32,56	3,30	0,16	0,09	0,002	6,9	3,00	0,40	2,7	0,061	1,73	46,3
Бол. Сухая	0,137	4,51	0,44	0,04	0,03	0,003	0,96	0,18	0,53	0,79	0,015	1,39	6,7
Мысовая	0,114	3,83	0,42	0,05	0,02	0,001	0,97	0,17	0,26	0,78	0,038	1,23	5,7
Половинная	0,097	3,19	0,62	0,06	0,02	0,002	0,64	0,19	0,39	1,73	0,112	1,33	5,1
Всего для 16 рек...	50,74	3820	384	51,9	13,9	1,06	936	182	258	638	22,1	515	5650

Сезонные изменения ионного стока зависят в первую очередь от сезонных изменений водности рек. В среднем в безледоставный период в Байкал поступает 78-84 % годового количества ионов и около 85 % кремния. Сроки максимального стока гидрохимических компонентов и максимума водности рек совпадают за небольшим исключением. Однако вследствие различий в минерализации воды химический сток отдельных рек не всегда строго пропорционален стоку воды. Так, хотя средний объем стока Томпуды и Хара-Мурин практически одинаков (1,08-1,00 км³/год), ионный сток первой из них в 4,5 раза выше. Сток Верх. Ангарты превышает сток Баргузин в 2,2 раза, в то же время ионный сток превышает сток соответственно всего на 33 %.

По сравнению с 50-ми годами в исследуемый период увеличился сток сульфатов, хлоридов, органического вещества.

Основная роль в увеличении притока в озеро названных веществ принадлежит Селенге и Верх. Ангарте, со стоком которых в Байкал поступает 2/3 сульфатов, более 80 % хлоридов и примерно 70 % органического вещества от общего поступления этих веществ с речными водами. Изменение химического стока по сравнению с 50-ми годами в значительной степени обусловлено увеличением концентрации в речных водах ряда компонентов. Так, в Селенге и Верх. Ангарте при увеличении стока воды соответственно на 2 и 17 % сток сульфатов возрос на 51 и 35 %, хлоридов - на 29 и 40 %, OB - на 52 и 94 %. Существенно возросло поступление указанных компонентов из притоков Южного Байкала, хотя их водность увеличилась по сравнению с 50-ми годами в основном лишь на 10-15 %. Так, сток сульфатов в реках Мысовая и Мангуриха увеличился в 1,9 раза, в Половинной - в 2,4, хлоридов в Снежной и Бол. Сухой - соответственно в 4,4 и 4, в Мангурихе и Мысовой - в 2,0 и 2,5 раза.

Доля атмосферной составляющей от речного ионного стока в химическом балансе Байкала увеличилась от 1,5 % в 50-х годах до 5,0 % в 1976-1984 гг. /Вотинцев и др., 1983/. Особенно возросло поступление на акваторию озера SO₄²⁻, Cl⁻, Na⁺, NH₄⁺, PO₄³⁻ и Si.

Основная часть расхода веществ (сток с водами Ангарты) практически не изменилась за сравниваемые периоды (табл. 10, 11).

Следует отметить, что, как и в 50-х годах, ряд химических компонентов поступает в Байкал в количествах, значительно превышающих их вынос из озера. К. К. Вотинцевым /1961/ показано, что кремний выводится из круговорота в водной толще Байкала в результате его потребления диатомовыми водорослями и отчасти губками с последующим увеличением в донные отложения в форме створок этих водорослей и спикул губок и захоронением здесь.

Общее количество железа, подвергающееся седиментации, близко к 25 тыс. т (в 1950 г. 30 тыс. т). По данным

Таблица 10. Средний годовой химический баланс Байкала ($\cdot 10^3$ т) в 50-х годах

Компонент	Приход			Всего	Расход сток через Ангору	Накопление в озере	
	18 ос- новных рек	осталь- ные притоки	атмос- ферные осадки			$\cdot 10^3$ т	% от прих- да
HCO_3^-	3540	531	53,0	4120	4050	70	1,7
SO_4^{2-}	277	41,6	9,00	328	255	73	22,3
Cl^-	42,2	6,33	0,90	49,4	25,8	23,6	47,8
Ca^{2+}	860	129	18,0	1010	1010	0	0
Mg^{2+}	165	24,8	1,00	191	138	53	27,8
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	204	30,6	4,00	239	258	-18	-7,5
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	27,7	4,16	-	31,9	0,60	31,3	98,1
SiO_2	466	69,9	4,00	540	136	404	74,8
Сумма ионов	5110	766	92	5970	5760	210	3,5

Таблица 11. Средний годовой химический баланс оз. Байкал ($\cdot 10^3$ т) в 1970, 1971, 1981-1984 гг.

Компонент	Приход			Всего	Расход сток через Ангору	Накопление в озере	
	16 ос- новных рек	осталь- ные притоки	атмос- ферные осадки			$\cdot 10^3$ т	% от приход
HCO_3^-	3820	570	51,6	4440	3390	1050	23,6
SO_4^{2-}	384	57,6	27,4	470	234	236	50,2
Cl^-	51,9	7,80	9,10	68,8	26,9	41,9	60,9
Ca^{2+}	935	140	15,1	1090	800	290	26,6
Mg^{2+}	182	27,4	3,80	213	146	67	31,5
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	258	38,7	27,3	324	196	128	39,5
NO_3^-	13,9	2,10	5,70	21,7	9,70	12	55,3
PO_4^{3-}	1,06	0,16	0,98	2,20	1,0	1,2	54,6
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	22,1	3,30	-	25,4	0,56	24,8	97,6
SiO_2	525	77	7,2	600	141	458	76,3
Сумма ионов	5650	847	141	6640	4800	1840	27,7

Л. З. Лейбович-Граниной /1985/, по приближенной оценке в озере его остается 460 т/год (или 93 %).

Основная масса взвешенного материала (до 95 %) поступает в озеро с водами Селенги, около 2 % - Верх. Ангарты и 1,5 % - Баргузиния. Остальные основные реки приносят в озеро десятые и сотые доли процента от общего его поступления с речным стоком. Общее количество взвеси, приносимое только основными притоками бассейна озера, составляет 2 млн т в год. Малые реки, которые по водному стоку составляют 15 %, вряд ли существенно увеличат поступление взвешенных веществ в озеро.

С водами Ангарты из озера выносятся 48,9 тыс. т взвешенного материала, что составляет всего 2,4 % от количества, вносимого с водами основных притоков бассейна озера. Действительно, Байкал является хорошим отстойником взвешенных веществ /Глазунов, 1963/.

Сезонное поступление взвешенного материала в течение года неравномерное, основная масса его приносится в озеро в летний период, как правило с максимумом в августе - сентябре, весенний максимум (май) в Селенге играет подчиненную роль, но в отдельные годы он доминирует /Тарасова и др., 1985; Тарасова и др., 1987/.

Сравнивая среднегодовое накопление в Байкале компонентов ионного состава в 50-х и 70-80-х годах, следует отметить, что в последнее время происходит увеличение их избытка, особенно заметное для Cl^- и SO_4^{2-} . Если в 50-х годах скорость накопления Cl^- составляла 0,001 мг/л, то в настоящее время - 0,002 мг/л, для SO_4^{2-} - 0,003 и 0,01 мг/л, для суммы

ионов - 0,009 и 0,08 мг/л соответственно. Необходимо учитывать погрешность баланса, а также и то, что содержание сульфатов уменьшается в зоне развития фитопланктона, тем не менее избыток сульфатов и хлоридов, который мы наблюдаем в настоящее время по сравнению с 50-ми годами, совпадает с антропогенной долей указанных компонентов, оценку которой мы дали совместно с сотрудниками Госкомгидромета /Тарасова и др., 1987/ (рис. 3).

Вклад от сточных вод и атмосферных выбросов Байкальского целлюлозно-бумажного (БЦБК), Селенгинского целлюлозно-картонного (СЦКК) комбинатов с атмосферными выбросами Ангартско-Иркутского промузла и с антропогенным стоком притоков по оценкам наших данных и Госкомгидромета составил по SO_4^{2-} 162 тыс. т, нами же получено превышение избытка сульфатов по сравнению с 50-ми годами 163 тыс. т; для Cl^- они были соответственно 27,2 и 18,3 тыс. т.

Из всех источников загрязняющих веществ только БЦБК находится непосредственно на побережье озера и его сточные воды по существу являются одним из притоков озера.

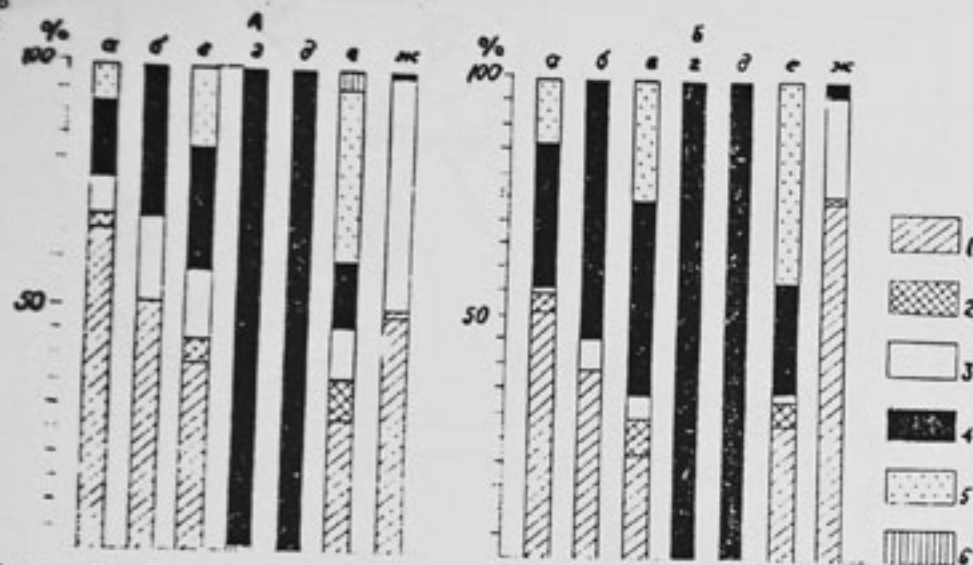


Рис. 3. Вклад отдельных источников (в %) в поступление различных загрязняющих веществ в оз. Байкал (А) и отдельно в южную его котловину (Б).

а - сумма минеральных веществ; б - Cl^- ; в - SO_4^{2-} ; г -

другие сернистые соединения; д - метилсернистые соединения; е - углеводороды (нефтепродукты); ж - фенолы. 1 - Селенга; 2 - СЦКК; 3 - другие притоки; 4 - БЦБК; 5 - Ангаро-Иркутский промузел; 6 - водный транспорт.

По объему сбросов и поступлению минеральных веществ в озеро сточные воды БЦБК соответствуют самой минерализованной реке - Бугульдейке, по стоку хлоридов только Селенга превосходит БЦБК, сульфатов в сточных водах немного меньше, чем в Баргузине. Поступление сульфатов и хлоридов в озеро со стоками БЦБК (30 и 7,89 тыс. т соответственно) значительно превосходит их поступление с водами всех основных притоков южной котловины озера (20,6 и 1,6 тыс. т) /Тарасова и др., 1987/.

По содержанию сульфатов (300 мг/л), хлоридов (78,9 мг/л), сумме минеральных веществ (460 мг/л) и органическому веществу (45 мг/л) сточные воды БЦБК соответственно в 34, 77, 4,1 и 3,6 раза превышают средние их значения для 16 основных притоков озера и в 29, 53, 3,3 и 2,9 - их содержание в водах Селенги.

Наибольшую нагрузку от хозяйственной деятельности человека испытывает Южный Байкал, в пределах которого в значительной мере локализуются вносимые от расположенных здесь на побережье озера и у впадающих рек предприятий и населенных пунктов загрязнения. К ним следует прибавить и часть загрязнений, вносимых в южную котловину Селенгой.

Поступление веществ антропогенного происхождения на едини-

цу площади Южного Байкала превышает аналогичную величину для Среднего и Северного Байкала, в том числе по хлоридам в 3,9 раза, по сульфатам - в 5,1 раза.

Сточные воды и атмосферные выбросы БЦБК вносят в южную часть озера 29,1 % минеральных веществ, в том числе 55 % хлоридов и 39 % сульфатов.

Приведенные данные об элементах химического баланса Байкала и результатах антропогенного воздействия свидетельствуют о том, что сформировавшийся за длительный период существования озера его гидрохимический облик оказался ныне нарушенным. Эти нарушения выражаются в обогащении вод озера такими химическими элементами, как хлориды и сульфаты, и некоторыми другими неорганическими и органическими веществами. Если существующая в первой половине 80-х годов интенсивность поступления в озеро химических веществ антропогенного происхождения сохранится до конца столетия, то можно ожидать, что с 2000 г. в водах Байкала концентрация минеральных веществ возрастет на 1,5 %, в том числе сульфатов на 3,6 %, хлоридов на 10 %, по органическому веществу на 18 %, N-NO_3^- на 10 %, P-PO_4^{3-} на 9 %. Все это может привести к изменению соотношения ионов в водах озера, т.е. к изменению гидрохимической фации озера.

Глава IV

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗЕРА

По химическому составу воды Байкала, как и формирующие его воды притоков, относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальция первого типа вод по классификации О. А. Алексина /1958/.

Средний ионный состав вод озера весьма близок среднему составу питающих его вод (табл. 12).

Сезонная, пространственная (по акватории) и вертикальная (по глубине) изменчивость основных компонентов ионного состава вод озера незначительна, исключая участки, находящиеся под влиянием крупных притоков /Вотинцев, 1960; Богданов, 1969, 1978/ (рис. 4). В то же время нельзя рассматривать состав байкальских вод как вполне однородный и неизменный.

Иллюстрацией неоднородности компонента ионного состава по вертикали и сезонам года могут служить результаты ежемесячных определений содержания сульфатов на глубоководных станциях в Южном Байкале с 1957 по 1987 г. (табл. 13, рис. 5, а-в; 6). Следует отметить, что характер сезонных изменений и вертикального распределения сульфатов в общем сохраняется как в 1957, 1958 и 1967, 1968 гг., так и в 1983-1984 гг.: в период гомотермии происходит выравнивание концентраций сульфатов по глубине; зимой максимум их содержания занимает глубины

28 Таблица 12. Химический состав вод притоков и Байкала (среднегодовые значения за 1981-1984 гг.), мг/л

Компонент	Притоки озера	Воды озера (средневе- щенные) в толще 0-1300 м	Поверхностные воды озера (0-0,5 м)
HCO_3^-	$71,6 \pm 1,4$	$66,5 \pm 1,3$	$67,1 \pm 1,3$
SO_4^{2-}	$7,5 \pm 0,5$	$5,0 \pm 0,45$	$4,9 \pm 0,40$
Cl^-	$0,9 \pm 0,07$	$0,4 \pm 0,03$	$0,6 \pm 0,05$
Ca^{2+}	$17,5 \pm 0,53$	$15,7 \pm 0,47$	$15,7 \pm 0,47$
Mg^{2+}	$3,6 \pm 0,25$	$3,1 \pm 0,21$	$3,1 \pm 0,21$
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	$4,6 \pm 1,0$	$3,9 \pm 0,9$	$4,5 \pm 1,0$
SiO_2	$9,95 \pm 1,0$	$4,7 \pm 0,47$	$4,2 \pm 0,42$
ОВ (ПО)	$12,2 \pm 0,70$	$1,35 \pm 0,08$	$1,41 \pm 0,08$
PO_4^{3-}	$0,019 \pm 0,001$	$0,027 \pm 0,002$	$0,015 \pm 0,001$
NO_3^-	$0,28 \pm 0,02$	$0,39 \pm 0,03$	$0,19 \pm 0,01$
Сумма ионов...	106	95,0	96,1

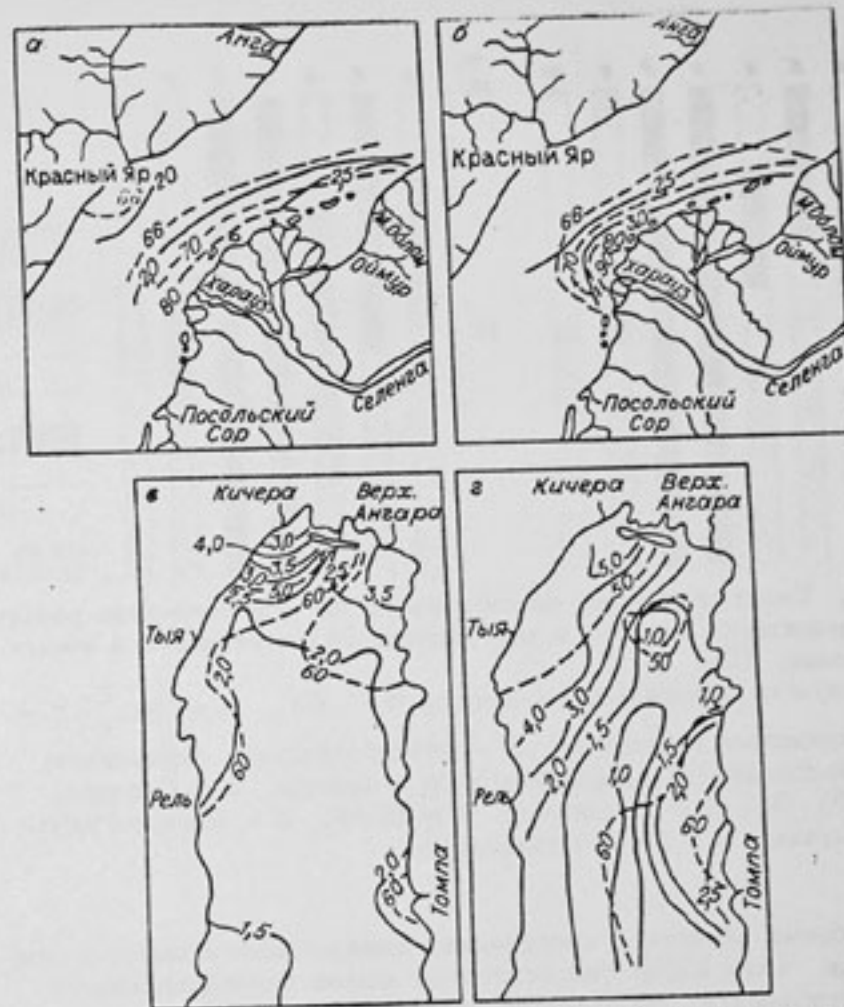


Рис. 4. Зоны влияния вод Селенги и Верх. Ангары на химический состав воды Байкала при различной ветровой обстановке.
а - селенгинское мелководье - слабый северо-восточный ветер (4-5 м/с), временами штиль; б - селенгинское мелководье - слабый северо-западный ветер (1-3 м/с); в - северная оконечность озера - южный ветер 4-5 баллов; г - северная оконечность озера - штиль.

до 100 м, а ниже по вертикали происходит постепенное уменьшение концентраций с небольшим повышением на глубине 1000 м. Размах колебаний количества сульфатов, который в 1957-1958 гг. был равен 3,4 мг/л (от 2,8 до 6,2), в 1983-1984 гг. увеличился до 6,4 мг/л (от 2,6 до 8,9), а в 1986-1987 гг. - до 18,5 мг/л (от 0,3 до 18,8) /Тарасова, Голобокова, Олесов, 1988/.

Вероятно, на содержании сульфатов в водах станции, находящейся в 12 км от м. Половинный, сказывается влияние сбросов

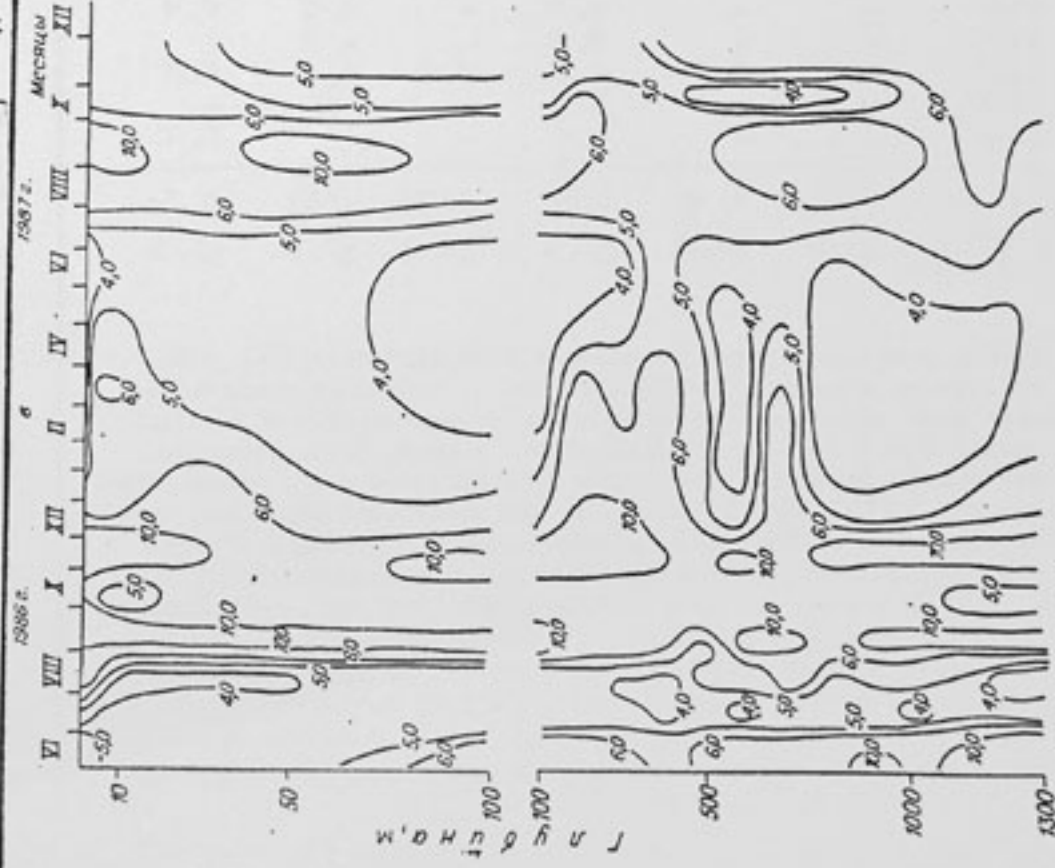
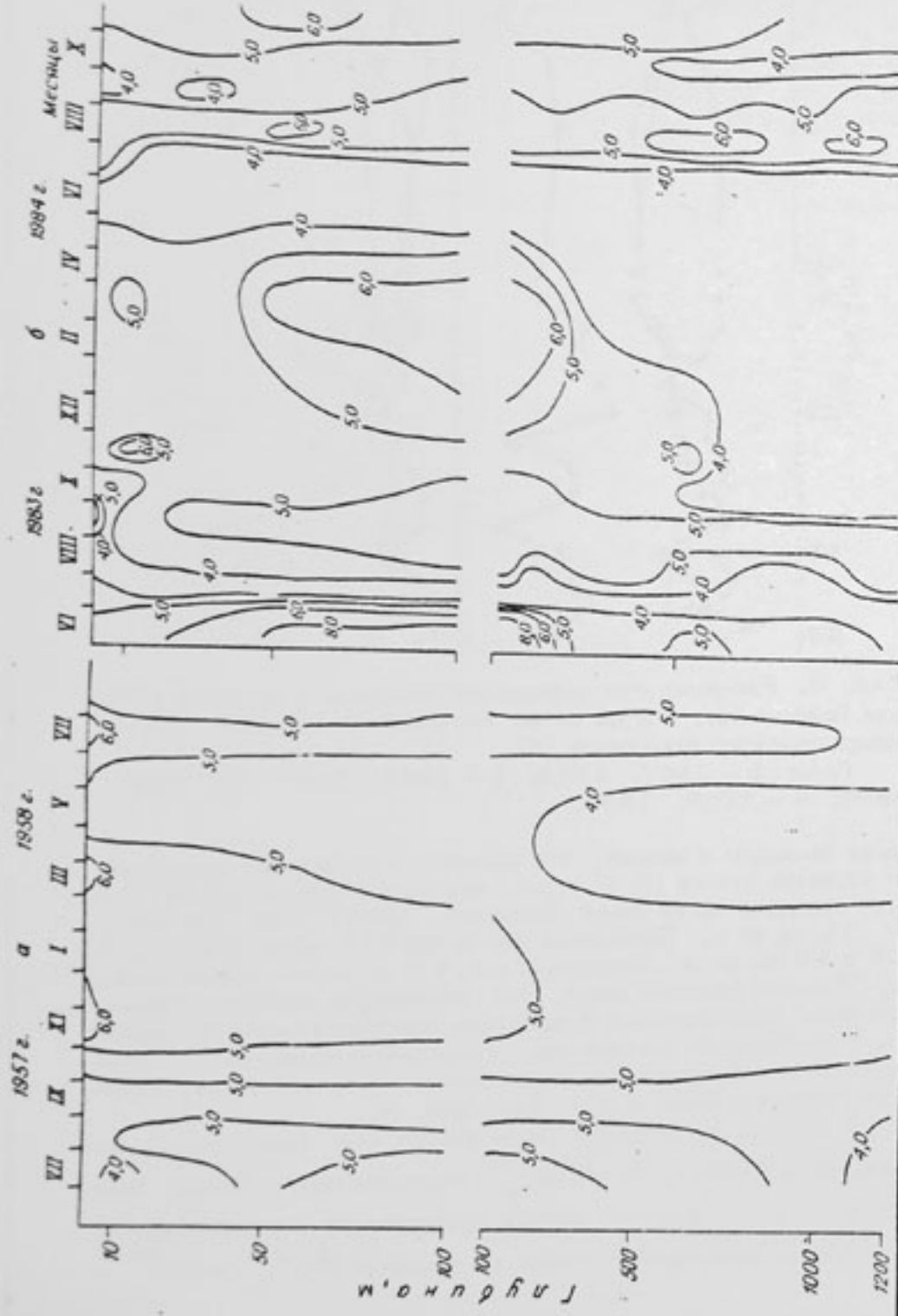


Рис. 5. Сезонные изменения содержания сульфатов (мг/л) в Южном Байкале.
а - ст. 7 км от м. Березовый; б, в - ст. 12 км от м. Поповинский.

Таблица 13. Распределение среднегодовых значений сульфатов по глубине в Южном Байкале, мг/л

Глубина, м	У м. Березовый		В 12 км от м. Половинный			
	в 7 км	в 15 км	1967, 1968	1981, 1982	1983, 1984	1986, 1987
0	5,5	5,1	3,9	4,8	4,6	7,8
5	5,2	5,1	-	-	-	7,4
10	5,1	5,1	4,4	4,8	4,7	7,5
25	5,0	5,0	4,1	4,9	4,8	6,7
50	5,0	5,0	3,8	5,3	5,0	6,6
100	4,9	4,9	3,9	5,2	5,3	6,9
200	4,8	4,9	3,8	4,9	5,0	6,1
300	4,7	4,8	4,1	4,6	4,6	6,4
400	-	-	4,9	-	4,6	5,9
500	4,7	4,8	4,1	4,7	4,6	5,7
600	-	-	4,1	-	4,5	7,4
700	-	-	3,8	4,5	4,4	6,4
750	4,6	4,7	-	-	-	-
800	-	-	4,0	-	4,1	6,4
900	-	-	3,8	-	4,0	7,7
1000	4,8	4,7	4,0	4,7	5,0	6,6
1100	-	-	3,7	-	4,3	6,4
1150	-	-	3,8	-	-	-
1200	4,6	4,7	4,2	4,8	4,4	6,3
1250	-	-	3,2	-	-	-
1300	-	-	3,8	-	-	6,7

Среднее 4,7± 4,8± 3,9± 4,7± 4,6± 6,5±
в слое ±0,3 ±0,3 ±1,2 ±1,0 ±0,6 ±2,2
0-1300 м

БШБК, в стоках которых их концентрация достигает 300 мг/л. На этой же станции в 1986-1987 гг. в глубинных водах отмечено четко выраженное повышение содержания сульфатов на горизонтах 600 и 900 м, обусловленное, видимо, динамическими факторами. Глубинные максимумы найдены нами и для взвеси /Тарасова, 1972, 1975, 1985/ и, как будет показано ниже, для хлорофилла "а". Увеличение среднегодового содержания в толще вод глубоководной станции 12 км от м. Половинный от 3,9 мг/л в 1967-1968 гг. до 6,5 мг/л в 1986-1987 гг., обусловленное динамическими процессами - опусканием верхней зоны вод в нижнюю, свидетельствует о том, что загрязнению подвергаются даже воды открытой части озера, а на дно может поступать нетрансформированное органическое вещество. С другой стороны, на основе анализа межгодовых значений содержания сульфатов в разных районах

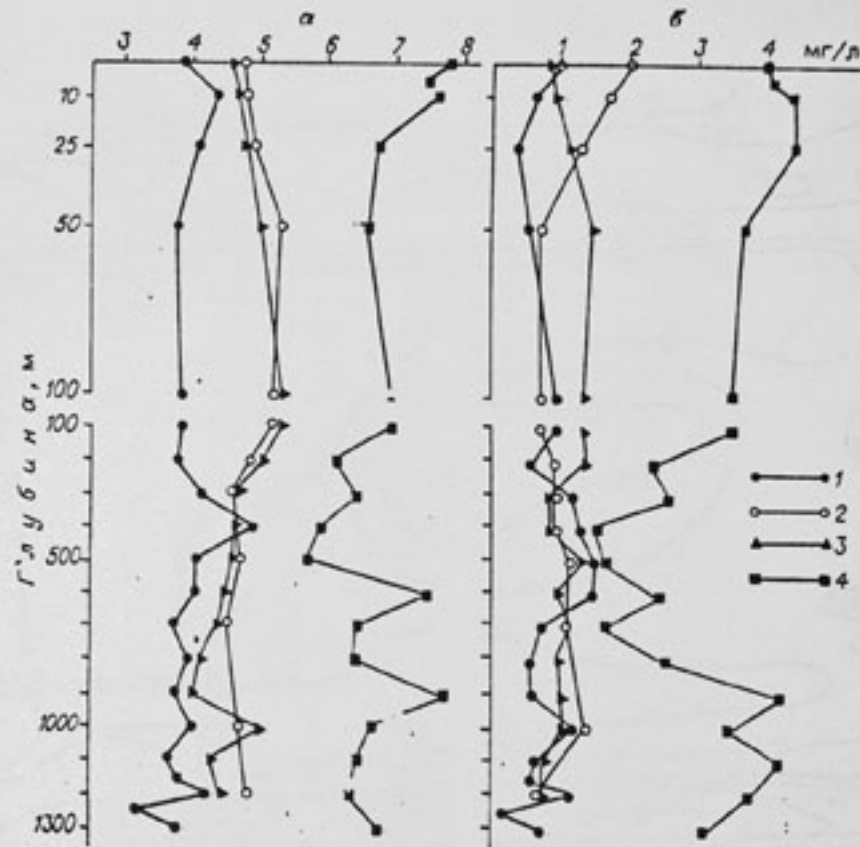


Рис. 6. Распределение содержания сульфатов с глубиной в Южном Байкале (ст. 12 км от м. Половинный) (а) и его средне-квадратического отклонения (б).

Годы: 1 - 1967, 1968; 2 - 1981, 1982; 3 - 1983, 1984; 4 - 1986, 1987.

озера приходим к выводу, что фоновая концентрация сульфатов не является единой (5,2 мг/л), как представлялась ранее, для всей открытой части озера /Вотинцев, 1961/. Так, для вод ст. 12 км от м. Половинный она будет 3,9 мг/л, для вод ст. в 7 и 15 км от м. Березовый - 4,7 и 4,8 мг/л соответственно. Площади участков озера, где сказывается влияние крупных притоков, выражающееся в заметной пространственной изменчивости химического состава вод, существенно изменяются в зависимости от водности реки, направления и скорости ветра, характера течения в озере и т. п. (см. рис. 4).

В отличие от питающих озеро речных вод, воды Байкала принадлежат к $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ гидрохимической фации. Воды притоков и атмосферных осадков претерпевают в озере глубокие изменения, приводящие к смене их исходных $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} -$

H_2O или HCO_3^- - SiO_2 - Ca^{2+} гидрохимических фаций. Одним из процессов, ответственных за это, является биогенное извлечение кремния диатомовыми водорослями с последующим захоронением их кремневых створок в донных отложениях. Лишь около 20 % двуокиси кремния, содержащегося в створках диатомей, возвращается в толщу воды озера при опускании их на дно /Вотинцев, 1961/.

Исследования содержания взвешенного материала в водах озера начаты с 1967 г. /Тарасова, 1975/. 1968 и 1982 гг. характеризовались как годы высокого урожая мелозир байкальской; 1969 г. - синедры; 1978, 1986, 1988 гг. - бедные по урожайности фитопланктона. Для 1971 и 1973 гг. характерны большие дождевые паводки. Массовое развитие нитишии ацикулярис отмечалось в 1984 и 1987 гг. Изменения содержания водной взвеси в водах Байкала в течение суток незначительны (коэффициенты вариаций ее не превышают точность методов исследования) /Тарасова, 1977/.

Напротив, пространственная и временная изменчивость количества взвешенных веществ в водах Байкала значительна. Поверхностные съемки, проведенные по всему озеру, показывают, что взвешенный материал по его акватории распределен неравномерно: повышенное содержание общего количества взвеси проявляется у дельты Селенги, северной и южной оконечностей озера и в Чивыркуйском заливе (рис. 7). В июне обилие взвеси (от 1, 10 до 4, 60 мг/л) обусловлено развитием водорослей, на что указывают цвет взвеси (буровато-зеленый) и исследования препаратов взвеси под микроскопом. В июле взвесь в основном имела коричневые и серые оттенки, что свидетельствует о преобладании минеральных веществ над биогенными. Повышенное содержание взвешенного материала (от 1, 10 до 10, 00 мг/л) несомненно связано с начавшимся паводком в реках вследствие обильных дождей.

В сентябре количество взвеси не снижается менее 1, 50 мг/л и область вод с концентрацией от 2, 00 до 3, 00 мг/л занимает преобладающую часть озера. Цвет взвеси - бурый. Резко снижается количество взвеси в ноябре (от 0, 40 до 1, 20 мг/л).

Основными компонентами минеральной взвеси являются минералы палитовой фракции, гидроксиды железа, зерна рудных минералов, кварзы, встречаются также биотит, эпидот, амфиболы, хлориты, плагиоклаз и др.

В составе взвешенного ОБ в водах Байкала преобладающим компонентом (70-98 %) является детрит. Только в период максимума развития мелозир (июнь 1968 г.) он составляет незначительную долю во взвешенном ОБ (2 %). Вертикальная изменчивость содержания взвеси также незначительна. Общее количество взвеси в поверхностном слое изменяется от 0, 70 до 2, 60 мг/л. С глубиной содержание ее снижается и уже на горизонте 1400 м у м. Кадильного - от 0, 36 до 0, 50 мг/л, на 1500 м у м. Ухан - от 0, 30 до 0, 50 мг/л, на 800 м у м. Елохин -

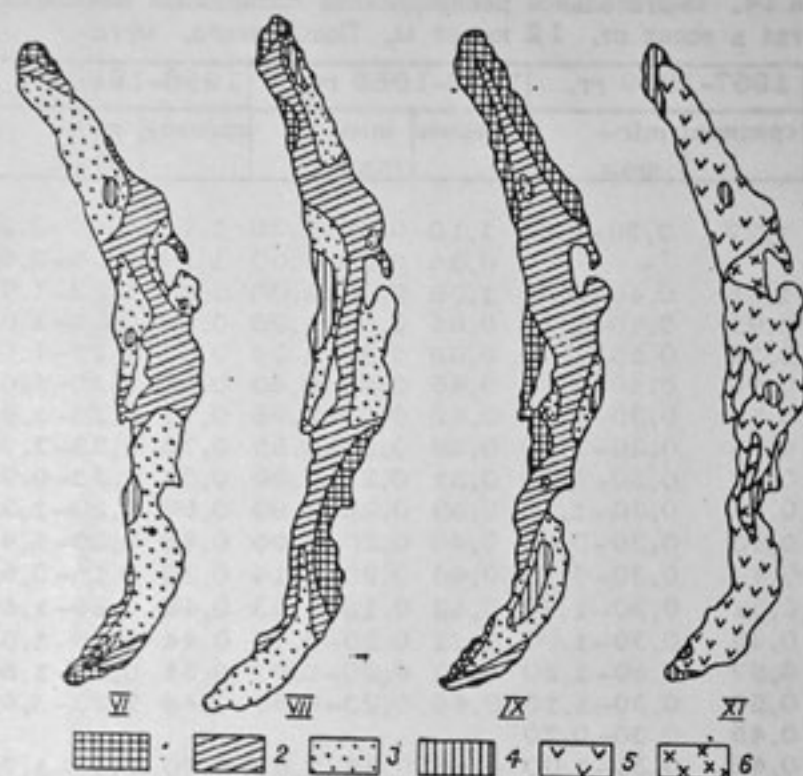


Рис. 7. Содержание взвешенных веществ (мг/л) в поверхностных водах Байкала в различные месяцы.

1 - > 3, 0; 2 - 2, 0-3, 0; 3 - 1, 5-2, 0; 4 - 1, 0-1, 5; 5 - 0, 5-1, 0; 6 - < 0, 5; VI - XI - месяцы.

от 0, 43 до 0, 70 мг/л. Область повышенного содержания (больше 1, 00 мг/л) взвешенного материала в водах станции у м. Кадильного до глубины 350 м, у м. Ухан - до 200, а у м. Елохин - до 600 м.

Эпизодически в глубинных водах открытого Байкала были отмечены повышенные концентрации взвеси: на горизонте 1100 м в мае 1968 г. и на горизонте 800 и 900 м в августе 1968 г. в водах станции Южного Байкала /Тарасова, 1975/. При микроскопическом исследовании препаратов взвеси обнаружено значительное количество живых клеток мелозир. Это дало возможность предположить об опускании поверхностных вод вдоль склона, что было ранее отмечено В. В. Толмачевым /1957/, М. Н. Ли, П. Г. Нейуиминим, П. П. Шерстянкиным /1970/, В. Н. Соффером, В. С. Брезгуновым, В. И. Верболовым и др. /1970/.

Многослетние исследования концентрации взвеси по вертикали в водах глубоководной станции в Южном Байкале (12 км от м. Половинного) позволили изучить межгодовую тенденцию изменчивости содержания водной взвеси. Размах колебаний содержания взвешенных веществ во всей толще воды в 1986-1989 гг. зна-

Таблица 14. Вертикальное распределение содержания взвешенного вещества в водах ст. 12 км от м. Половинного, мг/л

Глубина, м	1967-1969 гг.		1982-1985 гг.		1986-1989 гг.	
	среднее	min-max	среднее	min-max	среднее	min-max
0	1,27	0,70-2,00	1,10	0,40-2,20	1,15	0,40-3,20
5	-	-	0,86	0,65-2,00	1,14	0,28-3,60
10	1,05	0,40-2,60	1,08	0,30-2,00	1,17	0,23-1,96
25	0,91	0,40-2,20	0,86	0,60-1,25	0,96	0,26-1,60
50	0,74	0,50-1,70	0,86	0,30-1,33	0,82	0,20-1,65
100	0,68	0,40-1,80	0,46	0,30-0,80	0,65	0,30-1,60
200	0,52	0,30-0,90	0,49	0,27-0,98	0,73	0,23-1,80
300	0,54	0,20-1,10	0,48	0,20-0,85	0,78	0,33-1,50
400	0,52	0,30-1,20	0,51	0,25-0,80	0,52	0,23-0,95
500	0,46	0,30-1,10	0,49	0,22-0,80	0,50	0,20-1,37
600	0,43	0,30-0,80	0,48	0,20-1,00	0,48	0,20-1,45
700	0,42	0,30-0,70	0,46	0,20-1,14	0,30	0,15-0,60
800	0,51	0,30-1,00	0,42	0,18-1,03	0,48	0,26-1,50
900	0,49	0,30-1,00	0,41	0,20-0,90	0,44	0,10-1,50
1000	0,57	0,30-1,20	0,40	0,20-0,67	0,61	0,20-1,80
1100	0,56	0,30-1,10	0,46	0,23-0,80	0,48	0,23-4,90
1150	0,45	0,30-0,70	-	-	-	-
1200	0,46	0,30-1,00	0,48	0,26-1,00	0,70	0,48-1,75
1250	0,47	0,30-0,70	-	-	-	-
1300	0,54	0,30-0,90	0,46	0,25-0,80	0,52	0,20-1,30

Среднее

в слое

0-1300 м $0,53 \pm 0,10$ $0,48 \pm 0,11$ $0,57 \pm 0,16$

чительно шире, чем в 1967-1969 гг. и 1982-1985 гг. (табл. 14). Характерной особенностью сезонной динамики концентрации взвеси в трофогенном слое в последние годы является повышенное ее содержание в течение всего периода открытой воды в озере: в 1986 г. область вод выше 1,1 мг/л простиралась до 400 м, в 1987 г. - до 600, в 1988 г. - до 30-35 м. Максимальное количество взвеси (выше 1,5 мг/л) приходится на осенний период (август - октябрь). Оно отмечалось в 1986 г. в области вод до 300 м, в 1987 г. - до 40, в 1988 г. - до 25 м. Встречаются они в глубинной области (рис. 8). Как и ранее, в распределении взвеси по вертикали (по средним значениям) отмечается уменьшение ее концентрации с глубиной, особенно резкое в пределах 0-100 м (рис. 9, а). Максимумы содержания взвешенного материала в глубинной области с 1986 по 1989 г. выражены более отчетливо, чем в прежние периоды, и приходятся на горизонты 300, 1200 и 1300 м. На указанных горизонтах средне-

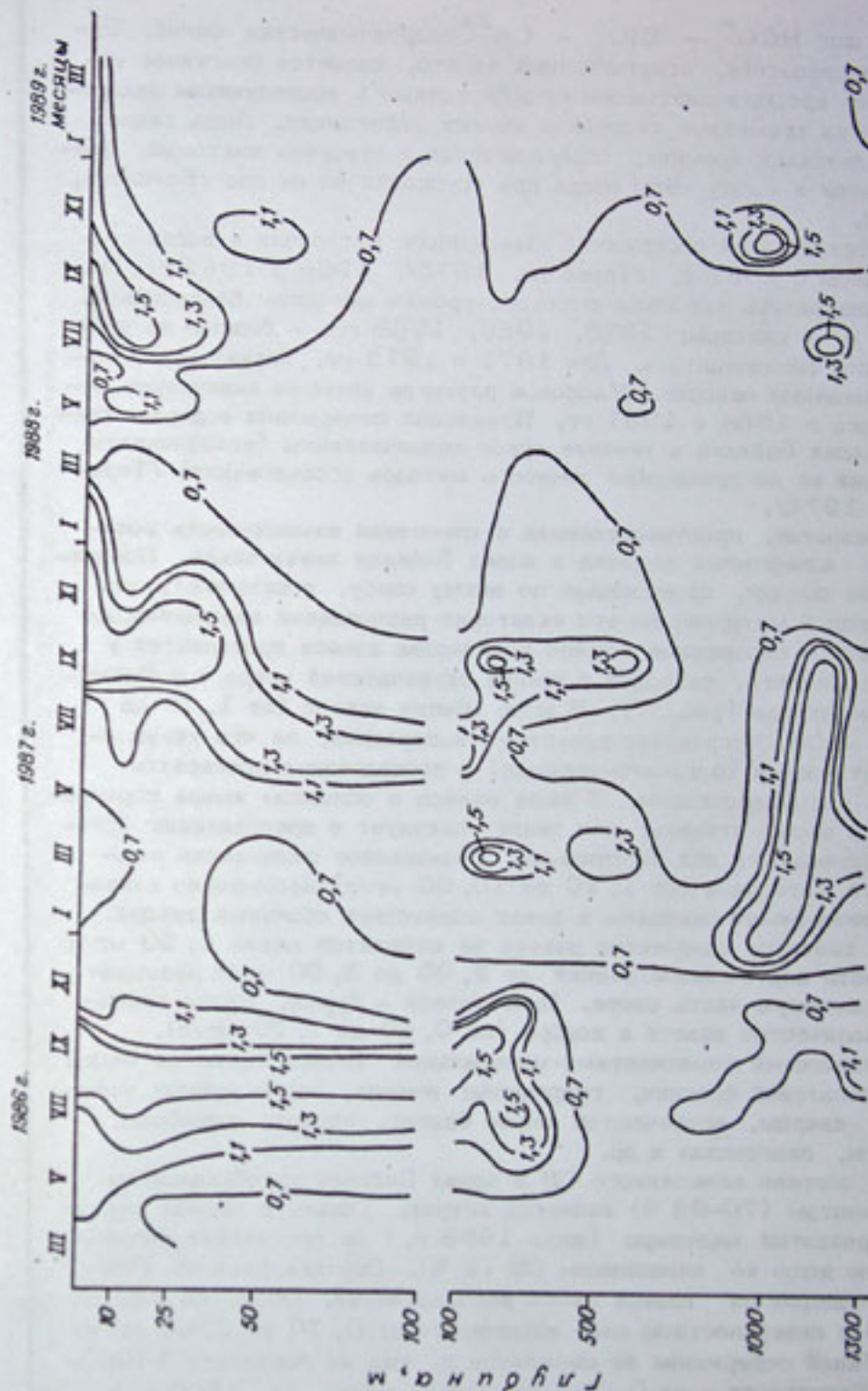


Рис. 8. Сезонные изменения содержания взвешенных веществ (мг/л) в Южном Байкале.

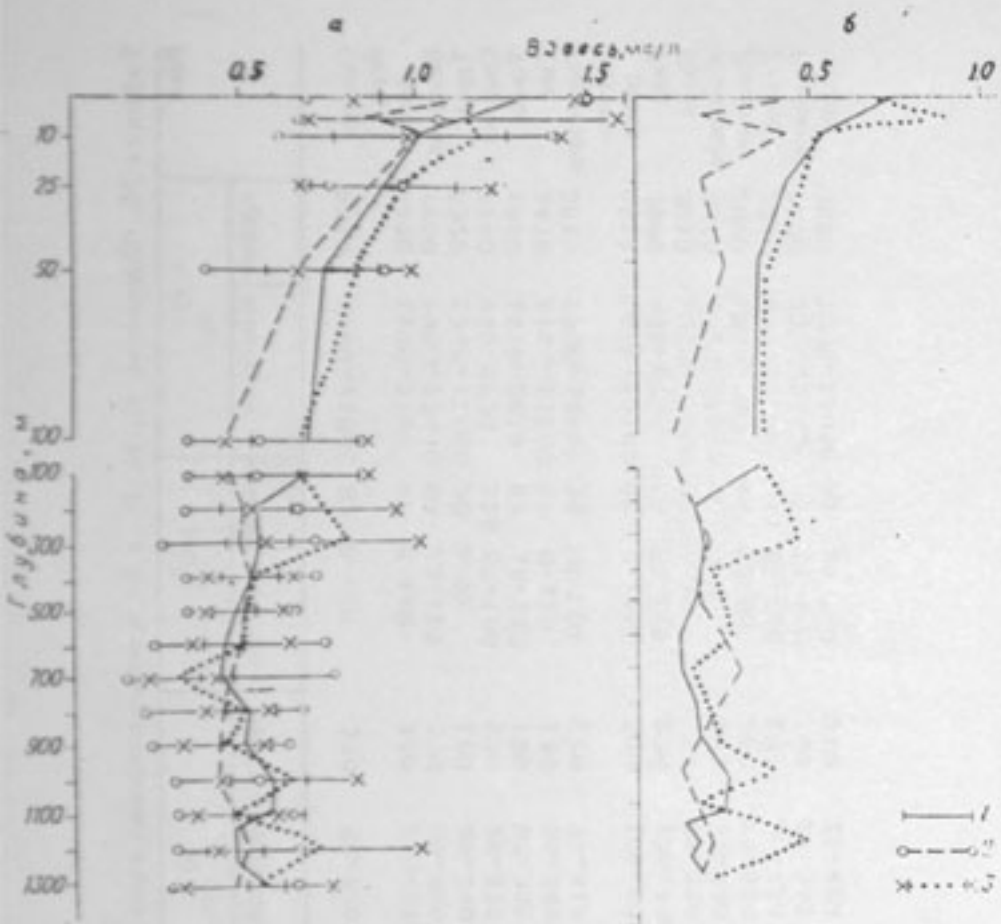


Рис. 9. Распределение взвешенных веществ (а) и среднеквадратического отклонения их количества (б) с глубиной в Южном Байкале.

Годы: 1 - 1967-1969; 2 - 1982-1985; 3 - 1986-1989.

квадратические отклонения количества взвеси максимальны (см. рис. 9, б). В среднем же в толще вод 0-1300 м количество взвеси осталось неизменным: в 1967-1969 гг. оно было $0,53 \pm 0,10$; в 1982-1985 гг. - $0,48 \pm 0,11$, а в 1986-1989 гг. - $0,57 \pm 0,16$ мг/л.

Часть II

БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО

Глава V

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ДИНАМИКУ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДАХ ОЗЕРА

Режим органического вещества и биогенных элементов в притоках озера и их поступление в Байкал

По содержанию органических веществ воды отдельных притоков Байкала существенно различаются (табл. 15). Его сезонная изменчивость в нефитрованных речных водах подчинена общей закономерности. Минимальные значения приурочены к зимнему периоду. Летом во внепаводочное время концентрация ОВ вод притоков обычно несколько выше, чем зимой. С увеличением расходов воды в реке в период весенних паводков и при выпадении обильных осадков (хотя бы и не вызывающих паводки) содержание ОВ возрастает, в отдельных случаях достигая своего максимума.

Для большинства исследованных рек годовой максимум ОВ приходится на период весеннего паводка (апрель-июнь). Для некоторых из них (реки Турка, Хара-Мурин, Рель, Тья) этот максимум - единственный в году; в других реках (Снежная, Мысовая, Бол. Бугульдейка, Томпуда) наряду с осенним наблюдается второй (летний) максимум, приходящийся на июль-август или даже сентябрь. Самые крупные притоки Байкала - Селенга, Баргузин, Верх. Ангара - в отличие от других рек характеризуются высокими значениями ОВ на протяжении всего летнего периода (с мая по сентябрь), что связано прежде всего с большой площадью их водосбора.

Воды притоков Байкала разнятся по качественному составу ОВ, что хорошо видно по степени их окисленности, изменяющейся от 32 до 50 % /Тарасова, 1979; Тарасова и др., 1984/. Отношение кислорода перманганатной окисляемости к кислороду окисляемости бихроматной (ХПК) преимущественно превышает 40 % в высокоцветных водах, а в Селенге, Баргузине и др. достигает 67 % /Тарасова, Вотинцев, 1982/. Отношение кислорода перманганатной окисляемости к органическому углероду ($C_{орг}$) в основном > 1 , отношение $C : N$ изменяется от 11 до 44, $C : P$ - от 560 до 1900 (табл. 16).

Взвешенное ОВ колеблется в широких пределах (табл. 17), от общего его содержания в водах притоков оно составляет 3-10 %, от общего количества взвешенного материала - 2-16 % (табл. 18). Это означает, что с водами притоков преобладает поступление ОВ терригенного происхождения, стойкого в биохимическом отношении, устойчивых к окислению веществ гуминового комплекса, смываемых с бассейнов рек. Подтверждением сказанного служат низкие концен-

Таблица 15. Содержание C, N, P и Si в нефитрованных водах основных притоков Байкала (1983, 1984 гг.), мкг/л

Река	C _{орг}		N - NO ₃ ⁻		N _{орг}		P - PO ₄ ³⁻		P _{орг}		Si - SiO ₂	
	среднее	min-max	среднее	min-max	среднее	min-max	среднее	min-max	среднее	min-max	среднее	min-max
Селенга	6810	1980-21860	82	0-190	370	59-820	13	5-27	28	12-68	4680	1490-7590
Верх.												
Ангара	3240	1190-5790	45	0-110	340	150-710	5	2-11	8	5-24	3240	2950-5610
Баргузин	7960	1900-17440	64	23-110	330	59-860	9	2-33	18	12-70	4180	2520-6360
Турка	5320	1340-11840	30	0-50	180	29-240	6	1-22	10	6-21	3330	3170-4460
Снежная	3140	940-8770	118	57-180	190	29-320	8	2-19	6	4-9	3070	2910-4490
Томпа	1920	1010-2810	69	18-110	190	82-350	5	1-15	5	3-10	2880	1680-4040
Тыя	3470	1110-11660	57	0-110	130	65-240	6	2-15	6	3-13	2520	880-3270
Голоустная	3650	1900-12660	44	18-140	220	78-510	6	1-23	8	4-14	3860	2700-5980
Бугуль- дейка	6611	1650-13290	77	21-180	320	160-600	8	2-19	9	4-17	4810	3000-7470
Рель	2080	400-6770	83	23-140	220	130-480	5	1-11	5	2-11	2790	1550-4000
Сухая	3010	2010-5700	22	0-34	180	90-220	9	4-19	10	5-21	4170	2810-5540
Мантуриха	3350	1520-11580	40	0-80	190	37-640	4	1-11	9	4-16	4230	3380-5990
Мысовая	2890	1050-8590	44	23-80	160	25-550	9	2-21	9	3-17	4180	3170-8510
Утулик	3740	900-15700	141	27-250	180	30-420	9	2-38	18	7-39	3610	2540-4490
Половинка	7170	2570-14830	59	11-140	190	27-360	12	2-42	15	9-22	4620	3270-6370
Мурино	3659	1080-14030	81	23-160	210	29-420	5	2-19	7	4-17	8380	3030-4300

Таблица 16. Отношения биогенных элементов в нефитрованных водах основных притоков Байкала (по атомам)

Река	C:N	C:P	N _{орг} :P _{орг}	N-NO ₃ ⁻ : :P-PO ₄ ³⁻	Si: :N-NO ₃ ⁻	Si:N _{орг}	Si: :P-PO ₄ ³⁻	Si:P _{орг}
1983-1984 гг.								
Селенга	22	631	29	14	29	6	398	186
Верх. Ангара	11	1038	94	20	36	5	725	446
Баргузин	28	1180	41	16	33	6	514	257
Турка	36	1390	40	11	64	11	721	424
Снежная	20	1380	70	32	13	8	423	567
Томпа	12	1000	84	31	21	8	644	640
Тыя	32	1520	48	21	22	10	474	464
Голоустная	30	1810	60	17	44	9	726	531
Бугульдейка	24	1900	72	21	31	8	662	593
Рель	11	1090	98	37	17	6	625	621
Сухая	20	784	40	5	95	12	514	461
Мантуриха	20	962	47	22	53	11	1160	521
Мысовая	21	830	39	11	48	13	514	514
Утулик	24	560	22	35	13	10	445	222
Половинка	44	1250	28	11	39	12	423	341
Мурино	21	1320	66	36	21	8	756	535
1986 г.								
Мантуриха	15	885	58					
Мысовая	11	654	62					
Снежная	14	400	29					
Мурино	16	539	34					
Утулик	14	354	25					
1987-1990 гг.								
Селенга	21	300	13					

Таблица 17. Содержание углерода, азота и фосфора во взвеси вод основных притоков Байкала (1983, 1984 гг.), мкг/л

Река	C		N		P	
	сред-нее	min-max	сред-нее	min-max	сред-нее	min-max
Селенга	686	104-1240	37,6	11,2-99,7	0,89	0,20-1,29
Верх. Ангара	259	90-694	33,8	7,4-82,2	0,56	0,23-1,08
Баргузин	506	208-1058	44,7	15-82,4	0,90	0,20-1,97
Турка	196	80-516	25,9	3,7-52,4	0,49	0,23-0,72
Снежная	237	40-508	22,0	3,6-59,8	0,42	0,07-1,21
Томпа	157	16-384	16,0	1,8-48,6	0,44	0,18-0,88
Тыя	232	32-1294	18,1	3,6-48,6	0,42	0,23-0,70
Голоустная	177	32-568	29,2	5,6-82,2	0,61	0,13-1,28
Бугульдейка	220	16-568	27,8	5,6-92,8	0,63	0,15-0,93
Рель	120	16-300	10,9	3,6-30,0	0,53	0,10-1,35
Сухая	150	46-300	20,5	2,5-52,4	0,57	0,10-1,28
Мантуриха	253	48-838	22,2	1,9-48,2	0,44	0,10-0,73
Мысовая	224	56-568	23,9	3,7-71,2	0,42	0,12-0,67
Утулик	190	17-584	16,8	3,6-59,8	0,58	0,06-1,30
Половинка	218	40-400	32,5	1,9-89,5	0,62	0,34-2,02
Мурино	157	24-576	12,5	1,9-37,4	0,62	0,08-1,55
Кичера	310	142-774	19,6	5,6-18,8	0,69	0,23-0,99

трации фитопланктона в реках в вегетационный период /Вотинцев и др., 1975/ и высокие значения отношений C : N : P во взвешенном органическом веществе притоков озера (табл. 19). Следует отметить, что в последние 30 лет среднегодовое содержание ОВ (взвешенное по стоку) в ряде рек значительно увеличилось (см. табл. 6, 7).

Концентрация хлорофилла "а" в притоках невелика. Высокое содержание хлорофилла "а" (10,0 мкг/л) найдено в Селенге в июне и августе, в Баргузине (11,8 мкг/л) в июле. Зимой для большинства притоков концентрация хлорофилла "а" не превышает 1 и только в устье Селенги она бывает 1,3 мкг/л. По всей реке в пределах территории России зимой содержание хлорофилла "а" находится в обратной зависимости от содержания взвеси (рис. 10).

Сезонные изменения содержания минеральных форм N и P в большинстве случаев аналогичны изменчивости содержания главных ионов; характеризуются резкими различиями зимних и летних концентраций, а также значительным их снижением весной (иногда до аналитического нуля) и быстрым увеличением осенью.

Если содержание нитратного азота составляет в водах рек десятые доли миллиграмма на литр, то нитритный и аммонийный

Таблица 18. Относительное содержание взвешенного органического углерода в водах основных притоков Байкала (среднее за 1983, 1984 гг.)

Река	C взвеш' % от общего C _{орг}	C взвеш' % от общей взвеси
Селенга	10	2
Верх. Ангара	8	8
Баргузин	6	14
Турка	4	7
Снежная	8	13
Томпа	8	15
Тыя	7	8
Голоустная	4	9
Бугульдейка	3	4
Рель	6	7
Сухая	5	6
Мантуриха	8	14
Мысовая	8	9
Утулик	5	15
Половинка	3	8
Мурино	4	16

Таблица 19. Отношения C : N, C : P и N : P во взвеси вод основных притоков Байкала (средние за 1983, 1984 гг.), в атомах

Река	C:N	C:P	N:P
Селенга	21	1972	93
Верх. Ангара	9	1200	134
Баргузин	13	1455	199
Турка	9	1019	116
Снежная	13	1414	112
Томпа	12	936	81
Тыя	15	137	92
Голоустная	8	820	105
Бугульдейка	9	915	100
Рель	13	588	46
Сухая	9	694	81
Мантуриха	13	1507	114
Мысовая	11	1336	122
Утулик	13	832	63
Половинка	8	910	116
Мурино	15	655	45
Кичера	18	1173	64

азот присутствует крайне редко и в незначительных количествах — сотые доли миллиграмма на литр аммонийного и тысячные доли нитритного азота.

Содержание органических форм азота и фосфора находится в обратной зависимости от концентраций их минеральных форм: зимой наблюдается минимум, летом, особенно в периоды паводков, — максимум.

Сезонная изменчивость концентрации минерального и органического фосфора в водах самого крупного притока озера (Селенга) в конце 60-80-х годов представлена на рис. 11.

Резкое увеличение количества P_{орг} в зимний период в 1987 г. свидетельствует о большой антропогенной нагрузке на Селенгу. Основными источниками загрязнения ее вод за последние 10 лет являются сточные воды городов Улан-Удэ, Селенгинска и Кабанска (рис. 12, а). Еще в 1972 г. до ввода в эксплуата-

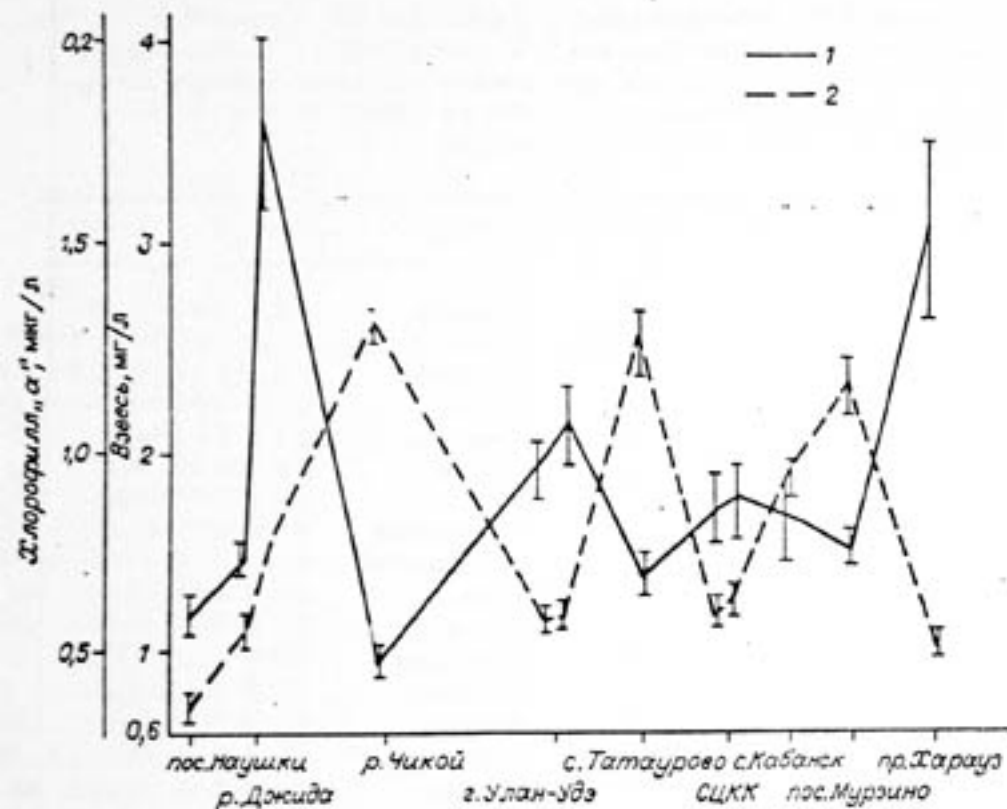


Рис. 10. Содержание общего количества взвешенных веществ (1) и хлорофилла "а" (2) в р. Селенге в пределах территории России.

цию целлюлозно-картонного завода в г. Селенгинске основным источником загрязнения вод реки были хозяйственные и промышленные стоки Улан-Удэнского промузла (см. рис. 12, б) и река справлялась с нагрузкой. Колебания же средних (взвешенных по стоку воды) годовых значений фосфора в р. Селенге с 60-х годов находятся в пределах: минеральный ($P-PO_4^{3-}$) - 10-18 мкг/л, органический (P_{org}) - 24-77 мкг/л. Максимальная концентрация общего фосфора (90 мкг/л) отмечалась в исключительно многоводном 1973 г., причем увеличение содержания органического фосфора (77 мкг/л) вероятно произошло в результате смыла рассеянных источников в ее бассейне.

Содержание кремния (в расчете на диоксид) в водах притоков Байкала достаточно высокое. В отдельных реках его концентрация в период максимума достигает 19-22 мг/л, однако чаще находится в пределах 8-12 мг/л.

По характеру сезонных колебаний содержания кремния все

Рис. 11. Сезонные изменения содержания органического и минерального фосфора в водах р. Селенги.

- 1 - P_{min} , 1968 г.;
- 2 - P_{org} , 1968 г.;
- 3 - P_{min} , 1987 г.;
- 4 - P_{org} , 1987 г.

притоки Байкала могут быть разделены на три группы /Вотинцев, 1965/.

В первую (наиболее распространенную) группу входят реки, воды которых характеризуются максимальной концентрацией кремния в зимний подледный период и минимумом в мае или июне (Селенга, Баргузин, Тья, Томпуда, Рель, Снежная, Половинная и др.).

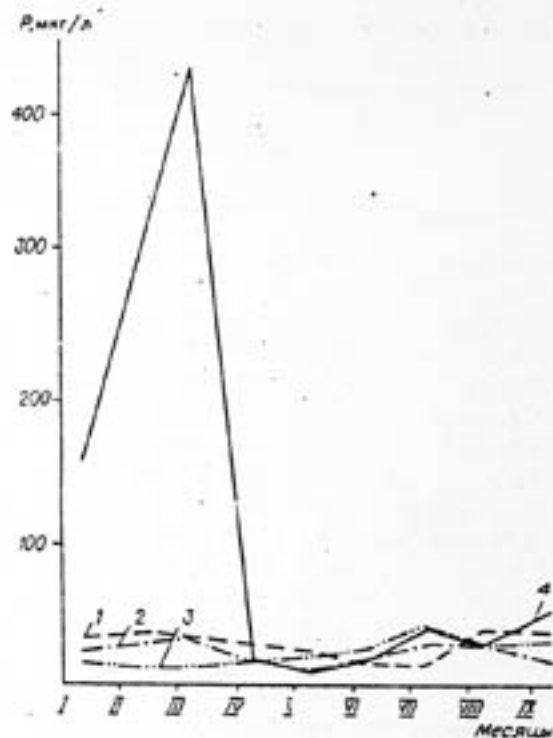
Вторую группу составляют притоки, в водах которых внутригодовой ход содержания кремния имеет два максимума (Мал. Бугульдейка, Крестовка, Хара-Мурин, Турка, Сарма и др.). Максимумы приходятся на апрель и июнь, минимумы - на май и август-октябрь.

Третья немногочисленная группа рек характеризуется относительным постоянством содержания кремния в течение года (реки Харгино и Заворотная).

Поступление железа и марганца в Байкал с речным стоком происходит преимущественно в форме взвесей зерен различных минералов, практически не растворимых в воде и подвергающихся седиментации в озере. Органоминеральные комплексы этих элементов, присутствующие в форме гуматов, быстро окисляются растворенным в водах рек кислородом и образуют коллоидальный гидроксид, подвергающийся коагуляции и седиментации в Байкале.

Суммарное содержание условно растворенного железа, определяемое родановым методом в нефилтрованных пробах воды, составляет в среднем 400 мкг/л, изменяясь в отдельных притоках от 30 до 480 мкг/л.

Изучение режима ОБ и биогенных элементов в реках, характер и основные особенности которых рассмотрены выше, позволило количественно оценить общий их сток в озеро (см. табл. 8, 9). Средний годовой сток ОБ основных притоков за исследованный



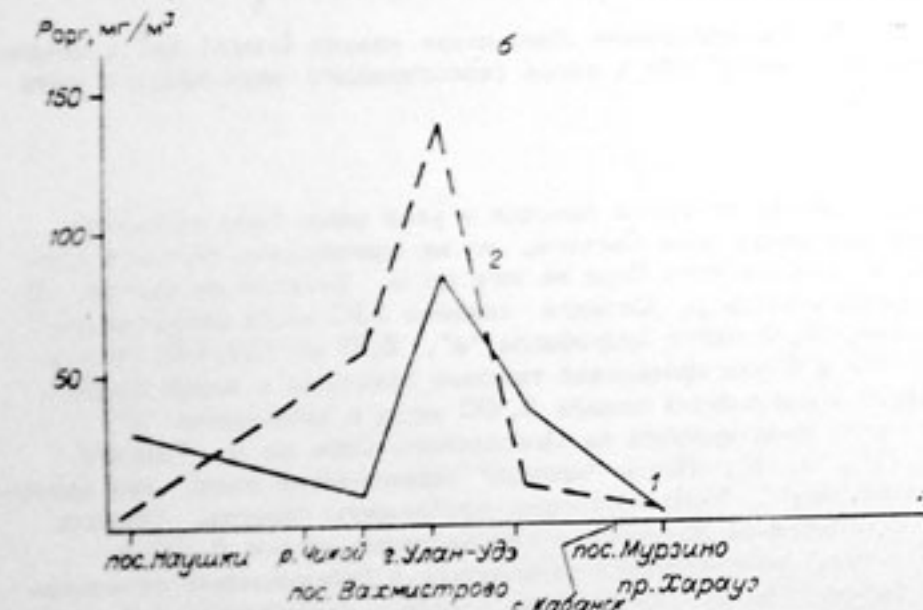
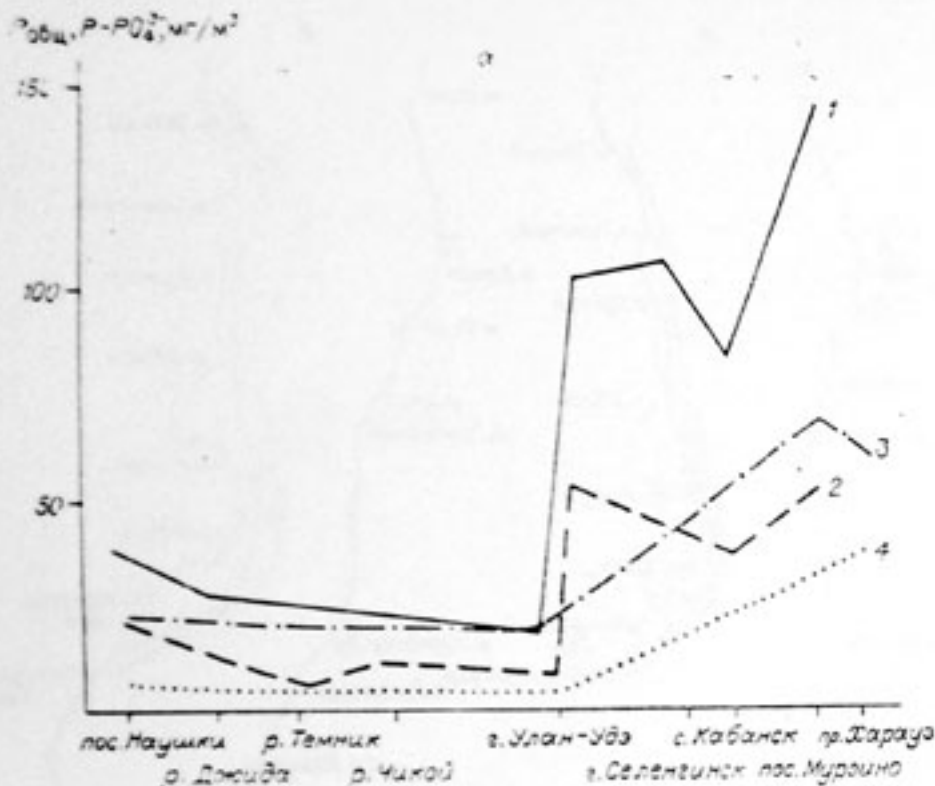


Рис. 12. Содержание фосфора в р. Селенге.

а - март: 1 - $P_{\text{общ}}$; 2 - $P-PO_4^{3-}$; апрель: 3 - $P_{\text{общ}}$; 4 - $P-PO_4^{3-}$. 1989 г.; б - $P_{\text{орг}}$ в феврале (1) и марте (2) 1973 г.

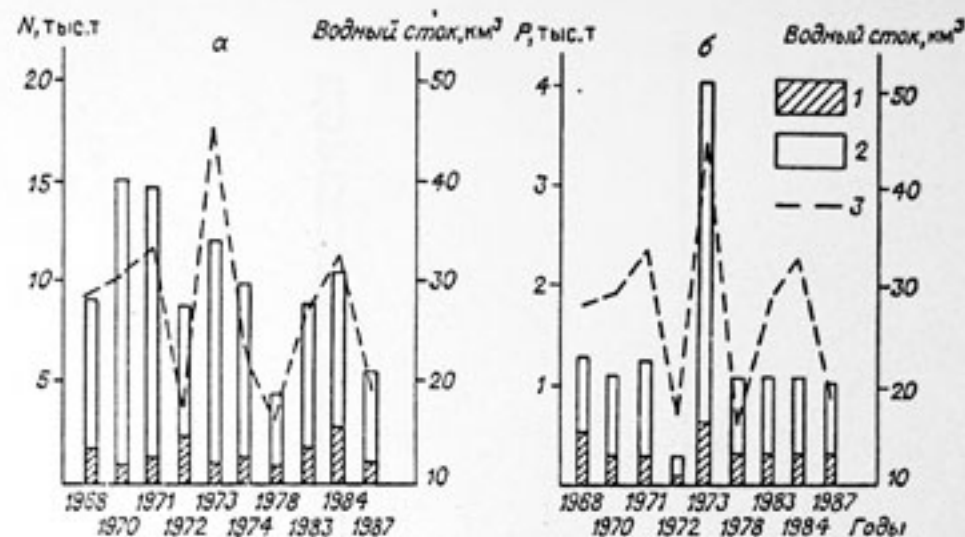


Рис. 13. Зависимость годового поступления в Байкал минеральных (1) и органических (2) форм азота (а) и фосфора (б) с водами Селенги от водного стока (3).

период составил 640 тыс. т, кремния - 515 тыс. т., что превысило на 55 и 10 % соответствующие показатели за 50-е годы.

Применительно к содержанию общего азота и фосфора в притоках озера можно рассматривать период с 1968 г., когда наряду с минеральными их формами были определены и органические. Ежегодное поступление в озеро азота и фосфора с речными водами за период с 1968 по 1987 г. изменчиво: доля поступления азота с реками озера зависит от водного стока (коэффициент корреляции составляет 0,90), для фосфора такой связи не обнаружено (коэффициент корреляции низок и составляет 0,67). Воды Селенги приносят в озеро до 40, а в иные годы и 60 % азота и фосфора. Полученные нами данные по динамике годового поступления минеральных и органических форм биогенов в воды озера с Селенгой (рис. 13, а, б) показывают, что изменение стока азота за 1968-1988 гг. аналогично водному стоку. Сток же фосфора, исключая маловодный 1972 и многоводный 1973 гг., почти не изменяется. Нарушение естественной пропорциональности поступления фосфора водному стоку в Селенге происходит за счет увеличения его стока в зимний период (рис. 14). Если зимой 1968 г. с водами Селенги поступало всего 5 % от годового стока фосфора, то в 1987 г. - 24 %. Отметим, что увеличение привноса фосфора в зимний период произошло за счет возрастания концентрации органических его форм, сток минерального же фосфора в зимний период с 1968 по 1987 г. не изменился. Следовательно, единственной причиной отмеченного явления может быть только загрязнение, что и было показано нами при рассмотрении сезонной динамики соединений фосфора в водах реки (см. рис. 11).

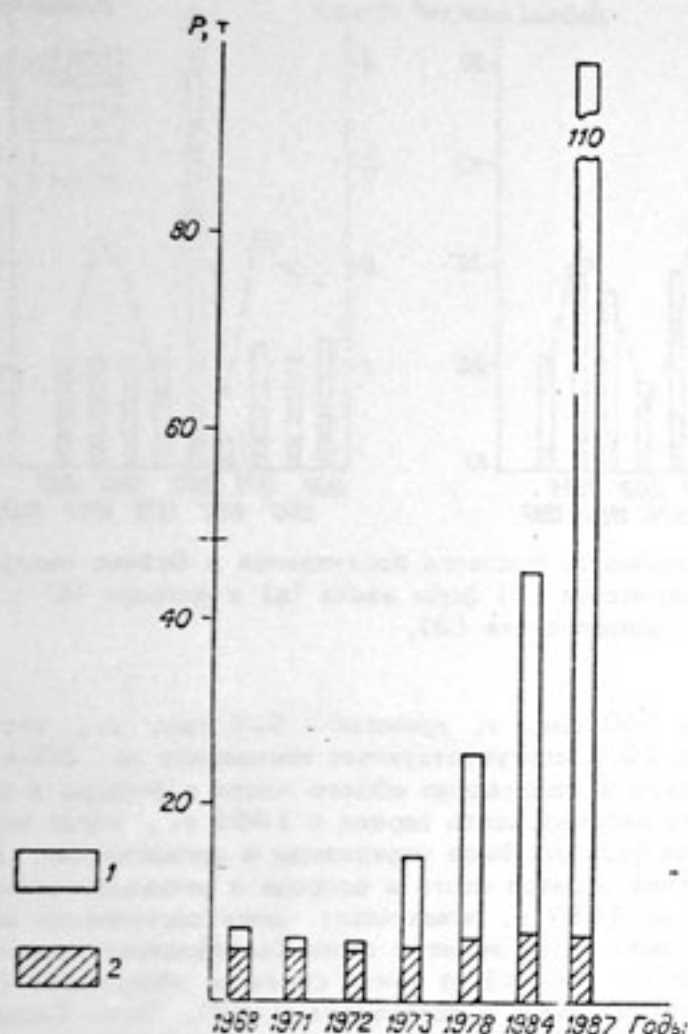


Рис. 14. Поступление в Байкал минерального (1) и органического (2) фосфора с водами Селенги в зимний период (март).

Распределение вод р. Селенги в водах озера

Исследование распределения селенгинских вод в водах озера по содержанию гидрокарбонатов и кремния впервые провел К. К. Вотинцев /1961/. Им было показано, что площади участков озера, где сказывается влияние вод Селенги, существенно изменяются в зависимости от водности реки, направления и скорости ветра (см. рис. 4). Позже, в период максимальных паводков в реке в 1971 и 1973 гг. по количеству взвешенных веществ в водах озера от Посольского Сора до м. Облом обнаружено, что воды Селенги 1,5-километровой полосой распространяются в основном на север озера /Тарасова, 1975/. Весной

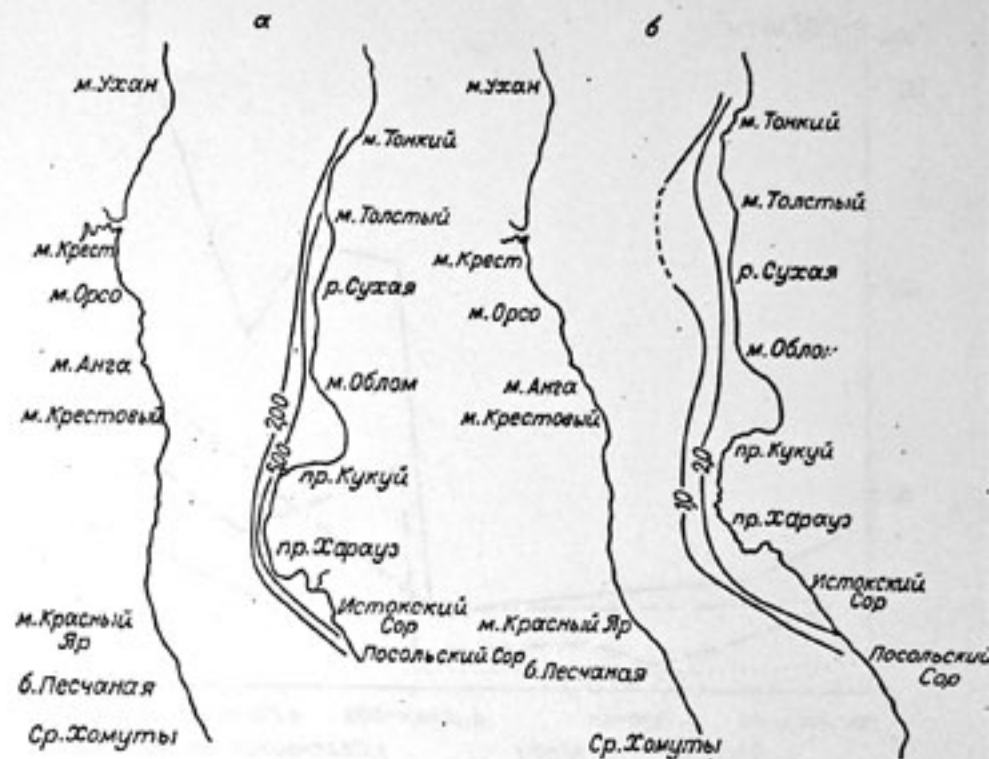


Рис. 15. Распределение содержания взвеси (мг/л) (а) и хлорофилла "а" (мкг/л) (б) в водах селенгинского мелководья в июне 1984 г.

1984 г. также во время паводка в реке нами была проведена съемка вод озера близ Селенги, но на значительно большей площади, от Посольского Сора на юге до м. Тонкого на севере. В это время в водах р. Селенги найдено 130 мг/л взвешенного вещества, 9,0 мкг/л хлорофилла "а", 6,0 мг С/л ОВ, что в 100, 10 и 6 раз превышало таковые величины в водах озера. Изолинии концентраций взвеси 5,00 мг/л и хлорофилла "а" 2,0 мкг/л простираются от Посольского Сора до м. Тонкого (рис. 15, а, б). Почти "чистые" селенгинские воды, как правило, занимают 1,5-километровую прибрежную область. Область вод, ограниченная изолиниями концентрации взвеси 5,00 и 2,00 мг/л, соответствует смешанным с байкальскими селенгинским водам. Между содержанием взвеси и хлорофиллом "а", хлорофилла "а" и концентрацией $C_{орг}$ найдена прямая зависимость (коэффициенты корреляции довольно высоки - 0,92 и 0,95). Это подтверждает, что источником повышенного содержания $C_{орг}$ на исследованной акватории озера являются воды Селенги.

Содержание углерода, азота и фосфора
в атмосферных осадках и их поступление
на акваторию озера

Первые сведения о содержании биогенных элементов и ОВ в атмосферных осадках и эоловой взвеси над Байкалом приведены в работах К. К. Вотинцева /1954, 1961а, б/. Систематические же наблюдения химического состава атмосферных осадков, в том числе ОВ и биогенных элементов, проводятся сотрудником Лимнологического института СО АН СССР Т. В. Ходжер с 1976 г. /Ходжер, Богданов, 1985; Ходжер и др., 1987; и др. /. Ею отбираются как суммарные месячные, так и единичные пробы осадков и эоловые взвеси. Отбор проб снежного покрова на акватории озера, как правило, приходится на март. Исследования ОВ ограничиваются определением перманганатной и бихроматной окисляемости, а биогенные элементы — их минеральными соединениями (аммонийный, нитритный и нитратный азот, фосфатный фосфор) в растворенной фракции. Нами эти исследования были дополнены определением $C_{орг}$, $N_{орг}$ и $P_{орг}$ как в растворенной, так и во взвешенной фракции. Получено, что в растворенной фракции в течение года азот в атмосферных осадках в основном представлен минеральными формами ($N-NH_4^+$, $N-NO_2^-$, $N-NO_3^-$), для фосфора же, напротив, количество ортофосфатов в растворе составляет всего 2-4 %. Для взвешенной фракции атмосферных осадков наблюдается обратная картина — минеральный фосфор составляет до 98 % и всего 1-2 % представлено органическими формами. Соотношение минеральных и органических форм фосфора в снежном покрове зависит от времени отбора проб. Так, содержание минерального фосфора в растворенной фракции увеличивается от 0,6-0,7 мкг/л 7 марта 1991 г. до 2-10 мкг/л 22 марта, а 29 марта оно уже составляет 10-14 мкг/л. Одновременно происходит резкое уменьшение минерального фосфора во взвешенной фракции снежного покрова, соответственно 17-26; 0-8; 0-4 мкг/л. Органический же фосфор на протяжении марта практически не изменяется, соотношение его растворенной и взвешенной фракций сохраняется. Следовательно, преобладающая часть органического фосфора находится в растворенном виде.

Ввиду того, что концентрация $P_{орг}$ остается на одном уровне, можно предполагать, что метод, используемый для определения минерального фосфора, включает определение не только ортофосфатов, но и полифосфатов, которые под действием солнечного ультрафиолетового облучения переходят в ортофосфаты. Таким образом, чтобы получить истинное содержание минеральной части фосфора в снежном покрове, необходимо определять как взвешенные, так и растворимые формы, а съемку отбора проб необходимо проводить в конце февраля — начале марта.

Содержание $C_{орг}$ в снежном покрове озера колеблется от 1,00 до 13,60 мг/л. Летучая фракция органического вещества довольно велика и составляет 11-37 %. Как правило, доля летучей фракции органического вещества повышена в промышленных и населенных районах. Отношение содержания кислорода перманганатной окисляемости к $C_{орг}$ колеблется от 0,55 до 0,97. Степень окисленности ОВ в атмосферных осадках озера зависит от района исследования и сезона года и изменяется от -54 до +45 %, причем повышенные ее значения совпадают с высокими значениями отношения содержания кислорода перманганатной и бихроматной окисляемости (до 60 %) и отмечены в атмосферных осадках около населенных пунктов. На основании этого можно сделать вывод, что органическое вещество атмосферных осадков указанных районов состоит из стойкой в биохимическом отношении фракции.

ОВ эоловой взвеси в 1986 г. составляло в среднем по озеру $0,76 \pm 0,21$ мг/л, что значительно превысило его долю от его общего количества в снежном покрове в 50-х годах, когда оно составляло всего 3,3 % (в 1986 г. 30 %).

Содержание растворенной кремниевой кислоты в атмосферных осадках Байкала в среднем равно 0,93 мг/л. Максимальные значения отмечены летом (3,20-8,70 мг/л).

На основе многолетних исследований установлено, что концентрация биогенных элементов, как и ОВ, в атмосферных осадках минимальна зимой и максимальна летом. Так, в июле количество азота нитратов возрастает до 65-130 мкг/л, аммонийного — до 160-319 мкг/л, органического — до 200-600 мкг/л. Содержание общего фосфора в осадках в течение года изменяется от 3 до 19 мкг/л (при колебании ортофосфатов от 1 до 7 мкг/л), органического фосфора — от 2 до 12 мкг/л /Ходжер и др., 1987/. Показано также, что содержание органического вещества и биогенных элементов в снежном покрове по акватории озера неравномерно (рис. 16, а). Так, $C_{орг}$ для Южного Байкала составляло 1,8 мг/л, Среднего — 1,4, Северного — 1,5 мг/л. Как правило, наибольшее его количество отмечалось у берегов озера, к центру же происходит снижение. Неравномерны распределение по акватории озера и концентрация ОВ в эоловой взвеси (см. рис. 16, б). Учитывая большое влияние выбросов промышленных комплексов в бассейне Байкала на количество биогенных элементов в атмосферных осадках над озером, нами в декабре 1986 г. была проведена подробная съемка снежного покрова в районе Иркутска, Ангарска, Шелехова, Черемхово, Байкальска, Улан-Удэ, Селенгинска и Усолья-Сибирского. Наряду с азотом и фосфором в пробах определялся органический углерод (табл. 20, 21). Максимальные концентрации органических форм азота и фосфора найдены у городов Байкальска, Улан-Удэ, Селенгинска, Нижнеангарска и Иркутска. Отношения углерода к фосфору в этих районах очень низки,

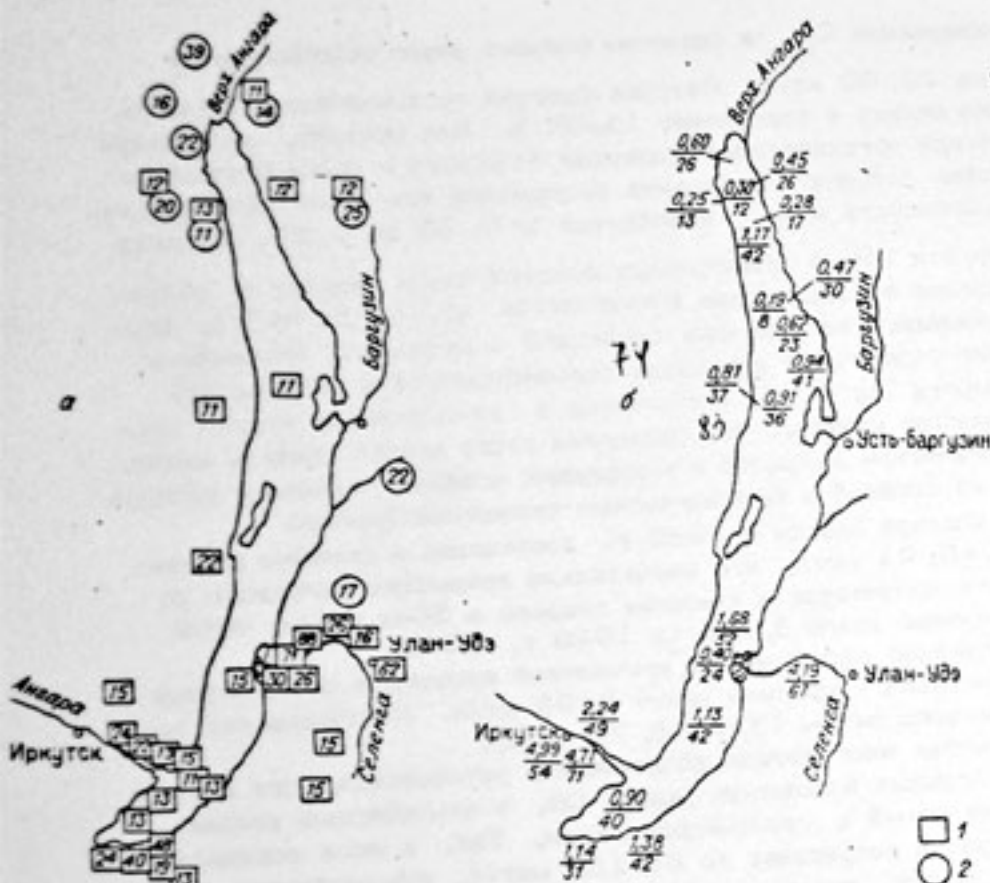


Рис. 16. Содержание органического фосфора в снежном покрове (а) (мкг/л) и органического вещества (C_{org}) золовой взвеси (б).

В числителе — мкг/л, в знаменателе — % от общего C_{org} в снежном покрове над акваторией оз. Байкал.

на акватории озера они возрастают до 200–360, но все же остаются ниже, чем наблюдаются в водах озера /Тарасова, 1975/.

Несмотря на значительное влияние промышленных комплексов на Байкал, содержание фосфора в атмосферных осадках над акваторией озера несколько ниже, чем наблюдаемые в различных районах мира. Так, среднегодовая концентрация общего фосфора в атмосферных осадках над Нарочанскими озерами составляет 30 мкг/л /Жукова, 1987/, над Ладожским озером — 32 мкг/л /Антропогенное эвтрофирование..., 1982/, для различных районов США количество ортофосфатов в дождевой воде колеблется от 30 до 100 мкг/л /Adams et al., 1979; Свейн, 1985; Bartsch, 1970/, в снеге из района оз. Кун-Лейка (Канада) концентрация фосфора достигает до 59 мкг/л /Singer, 1969/. Среднегодовые значения общего азота на северо-западе Белоруссии в бассейне р. Неман составляют 1500 мкг/л /Жукова, 1987/, что в 2,5 раза превышает максимальное содержание

Таблица 20. Содержание углерода, азота и фосфора в ОВ снежного покрова и золовой взвеси вокруг промышленных комплексов (декабрь 1986 г.), мкг-ат./л

Место взятия проб	Снежный покров			Золовая взвесь		
	C	N	P	C	N	P
Иркутск, ЦПКИО	507	46,7	5,87	314	16,4	3,52
Иркутск, ТЭЦ	147	52,9	0,74	130	48,6	0,37
Иркутск:						
по дороге на пос. Качуг	347	57,1	30,0	240	28,6	14,39
1 км по дороге в сторону Листвянки	192	10,0	0,07	182	7,14	0,36
5 км "	402	8,1	0,07	-	6,86	0,36
10 км "	158	57,1	1,48	257	50,0	0,77
20 км "	108	23,1	1,61	86	20,9	0,84
30 км "	114	12,1	1,42	75	10,0	0,68
Пос. Бол. Речка	250	21,4	0,52	110	7,14	0,19
Пос. Листвянка	305	20,0	1,00	168	17,6	-
Г. Черемхово, сквер	260	30,0	2,40	234	27,9	2,07
10 км от г. Черемхово по дороге в Иркутск	231	60,7	4,52	212	25,0	4,03
20 км "	315	42,0	0,90	221	32,1	0,61
31 км "	463	64,3	0,90	347	52,1	0,61
41 км "	363	35,7	-	254	31,4	-
51 км "	173	20,1	2,36	78	6,43	1,16
Г. Усолье-Сибирское:						
со стороны г. Черемхово	401	64,3	4,06	313	36,4	3,55
сквер	192	28,6	4,13	135	18,3	3,29
12 км от г. Усолье-Сибирское по дороге в Иркутск	400	93,0	4,19	304	-	3,29
22 км "	320	-	19,36	256	56,43	3,32
Г. Ангарск:						
со стороны Усолья-Сибирского	427	-	2,46	354	-	-
центр, у рынка	191	-	4,13	172	-	2,26
центр	504	129,0	4,19	343	71,43	2,98
1 км от Ангарска по дороге в Иркутск	217	114,0	5,16	147	-	3,23
Г. Шелехов, известковый завод	563	22,1	16,97	439	-	10,68
1 км от г. Шелехова по дороге в Иркутск	342	50,4	2,26	297	40,7	-
3 км "	222	27,2	0,97	200	24,5	0,36
10 км "	202	14,1	0,29	133	7,14	0,23
Г. Байкальск, центр	248	37,9	7,03	206	35,0	4,84
10 км от БЦБК по дороге на восток	393	131,4	10,0	315	92,9	3,23
20 км от БЦБК по дороге на пос. Танхой	143	128,6	8,32	90	10,0	4,84
10 км от СЦКК по дороге в г. Кабанск	176	80,7	9,68	141	71,4	6,45
У стока СЦКК в р. Селенгу	258	29,7	7,74	181	25,7	5,16
Улан-Удэ, сквер	288	71,4	5,48	201	35,7	3,55

Таблица 21. Отношения C:N, C:P и N:P в органическом веществе снежного покрова вокруг промышленных комплексов в декабре 1986 г., в атомах.

Место взятия проб	Снежный покров			Золотая взвесь		
	C:N	C:P	N:P	C:N	C:P	N:P
Иркутск, ЦПКиО	11	86	8	18	89	5
Иркутск, ТЭЦ	3	199	72	3	351	131
Иркутск:						
по дороге на пос. Качуг	6	17	3	8	17	2
1 км по дороге в сторону Листвянки	19	274	143	35	504	20
5 км "	50	574	116	-	-	19
10 км "	3	107	39	5	335	65
20 км "	5	67	14	4	102	25
30 км "	9	80	9	8	110	15
Пос. Бол. Речка	12	481	41	15	579	38
Пос. Листвянка	15	-	-	10	-	-
Г. Черемхово, сквер	9	108	13	8	113	13
10 км от г. Черемхово по дороге в Иркутск	4	51	13	9	53	6
20 км "	8	350	47	7	362	53
31 км "	7	514	71	7	568	48
41 км "	10	-	-	8	-	-
51 км "	9	73	9	12	67	6
Г. Усолье-Сибирское со стороны г. Черемхово	6	99	16	9	88	10
сквер	7	46	7	7	41	6
12 км от Усолья-Сибирского в Иркутск	4	96	22	-	90	-
22 км "	-	17	-	5	77	17
Г. Ангарск со стороны г. Усолье-Сибирское	-	173	-	-	-	-
центр, у рынка	-	46	-	-	76	-
центр	4	120	31	5	115	24
1 км от Ангарска по дороге в Иркутск	2	42	22	-	46	-
Г. Шелехов, известковый завод	26	33	13	-	41	-
1 км от г. Шелехова по дороге в Иркутск	7	151	22	7	-	-
3 км "	8	229	28	8	554	68
10 км "	14	696	49	19	579	31
Г. Байкальск, центр	7	35	5	6	43	7
10 км от БЦБК на восток	3	39	13	3	97	29
20 км " на Танхой	1	17	15	9	19	2
10 км от ЦИЖК в пос. Кабанск	2	18	8	2	22	11
У стока ЦИЖК в Селемгу	9	33	4	7	35	5
Улан-Удэ, сквер	6	57	10	4	53	13

общего азота в осадках над Байкалом (600 мкг/л) /Неринг и др., 1981/.

На основе полученных материалов по содержанию азота и фосфора в атмосферных осадках (фильтрованные пробы) нами было рассчитано их поступление на акваторию озера.

Впервые оценка атмосферного поступления для минеральных форм азота и фосфора дана К. К. Вотинцевым с соавторами /1965/. Получено, что в 50-х годах в озеро вносилось в год с осадками: $N-NO_3^-$ - 1, 2 тыс. т, $N-NH_4^+$ - 0, 87, $P-PO_4^{3-}$ - 0, 13 тыс. т, что составляло от речного привноса 39 % для азота и 11 % для фосфора. К. К. Вотинцев, А. И. Мешерякова и Т. В. Ходжер /1983/ сравнили поступление с атмосферными осадками в 70-х годах с 50-ми и нашли, что атмосферное поступление биогенных элементов возросло и составило для $N-NO_3^-$ 1, 29 тыс. т; для $N-NH_4^+$ 1, 84, и для $P-PO_4^{3-}$ 0, 32 тыс. т, что от общего речного привноса возросло до 86 % для азота и до 58 % для фосфора.

Используя тот же метод расчета /Вотинцев, 1961; Вотинцев и др., 1983/, нами было получено, что из атмосферы на акваторию озера выпадает 7, 1 тыс. т общего азота (при размахе колебаний 5, 9-8, 3 тыс. т), в том числе 4, 0 (3, 9-4, 1) тыс. т органического и 3, 1 (2, 0-4, 2) тыс. т минерального; общего фосфора - 0, 7 (0, 6-0, 8) тыс. т, включая 0, 4 (0, 3-0, 5) тыс. т органического и 0, 3 (0, 25-0, 35) тыс. т минерального. Суммарное поступление азота из атмосферы составило 37 % от общего привноса с речным стоком, фосфора - 44 %.

Байкал не является исключением в том, что большую роль в поступлении азота и фосфора в озеро играют атмосферные осадки. Так, атмосферный привнос фосфора в Балтийское море составляет 30 % от вносимого с реками /Неринг и др., 1981/, в оз. Нарочь атмосферные осадки поставляют до 50 % азота и 60 % фосфора от общего их поступления /Жукова, 1987/. Сравнение атмосферного и речного поступления биогенных элементов в оз. Байкал с таковым в Северную Атлантику и северную часть Тихого океана (табл. 22) показало, что атмосферный привнос от общего

Таблица 22. Погоди азота и фосфора в Северную Атлантику, северную часть Тихого океана /Duce, 1986/ и оз. Байкал мг/(м²·год)

Источник	Северная Атлантика		Северная часть Тихого океана		Байкал	
	N	P	N	P	N	P

Общий речной сток в прибрежную экосистему	340	200	140	80	600	51, 0
Атмосферный привнос	200	0, 7	86	0, 1	325	22, 5

речного стока в прибрежную часть сравнимых водоемов для азота составляет соответственно 37, 59 и 61 %. Атмосферное поступление в озеро фосфора значительно превосходит таковое в Атлантику и Тихий океан, но несколько ниже, чем в водоемы США - 10-60 мг/м² [Singer, 1969] или в почвы европейской части СССР - 20-20 мг/м² [Химический состав..., 1964/].

О динамике слива вод Байкала в Ангару

В 1933 г. Г. Ю. Верещагиным было установлено, что существенное влияние на режим вод озера и их стока оказывают ветры: при нагонных ветрах в Ангару поступают поверхностные, богатые живыми организмами воды, а при стогных ветрах выходят воды из глубинных слоев, обедненные живыми организмами.

Е. А. Коряков [1957/ считает, что в формировании биостока Ангары главную роль играет динамика вод, а не сезонные и годовые колебания в "урожаивности" планктона. О. М. Кожова [1960/ пришла к выводу, что Байкал оказывает влияние на состав планктонных водорослей Ангары.

Наблюдения над режимом течений вблизи истока Ангары [Маньковский, 1964; Сокольников, 1964; Верболов, 1977/ показали, что границу слива озерных вод в Ангару определяет местная циркуляция, струя слива озерных вод меняется как во времени, так и по глубине.

Съемка вод Лиственничного залива нами проведена в июне и августе 1984 г. на 28 станциях со следующих горизонтов: 0, 5, 10, 25 и 50 м.

Воды Ангары, как и воды Байкала, обладают низкой цветностью (от 0 до 5°), малым количеством взвешенных веществ (0,30-1,20 мг/л, для вод Байкала максимальная концентрация взвеси достигает 2,80 мг/л).

Минералогический состав водной взвеси Ангары беден во все сезоны года. Здесь присутствуют слюды, единичные зерна роговой обманки, карбоната, кварца и органические вещества. Максимальный размер зерен - от 0,04 до 0,14 мм. Содержание органического вещества (C_{org}) колеблется от 0,90 до 1,80 мг/л, причем максимум приходится на август (в водах озера же весенний максимум всегда превышает осенний). Концентрация нитратного азота изменяется от 41 до 61 мкг/л, фосфатного фосфора - от 4 до 11 мкг/л. Весной, когда в водах озера происходит значительное снижение содержания минеральных форм азота и фосфора за счет весеннего максимума в развитии фитопланктона, в водах истока оно остается довольно высоким. Лишь осенью в результате температурного расслоения вод Байкала количество нитратов падает до аналитического нуля. То же наблюдаем и в водах истока Ангары.

Материал наших исследований в Лиственничном заливе представлен на рис. 17.

В водах Лиственничного залива как в июне, так и в августе найдена слабая корреляция между содержанием хлорофилла "а" и

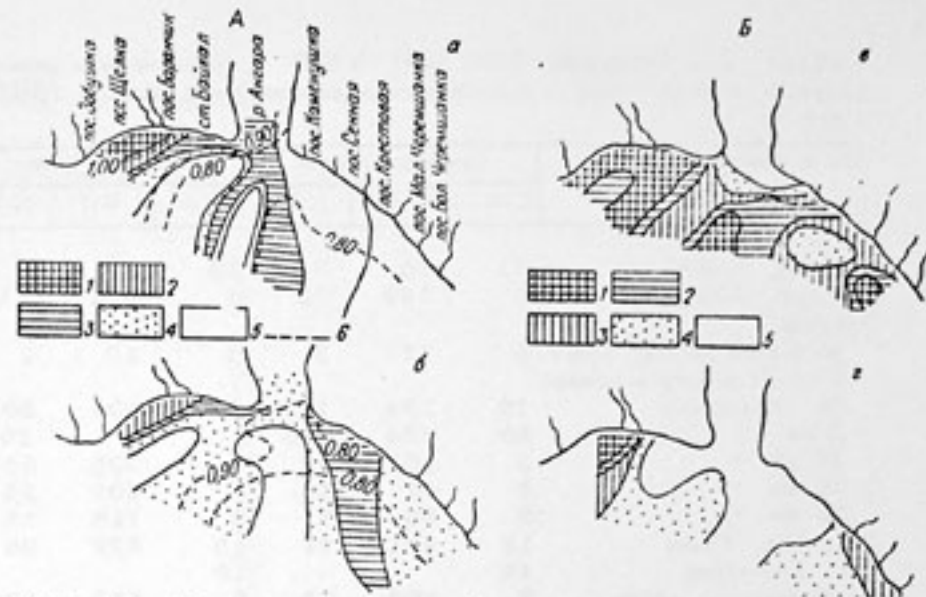


Рис. 17. Динамика стока вод Байкала через Ангару.

А - по общему количеству взвеси (мг/л) и перманганатной окисляемости (мг О/л) в июне 1984 г.: а - с 0 м; б - с 25 м; 1 - > 2,00 мг/л; 2 - 1,50-2,00; 3 - 1,20-1,50; 4 - 1,00-1,20; 5 - < 1,00 мг/л; 6 - перманганатная окисляемость;

Б - по общему количеству взвеси в августе 1984 г.: в - с 0 м; г - с 50 м; 1 - > 1,00 мг/л; 2 - 0,80-1,00; 3 - 0,60-0,80; 4 - 0,40-0,60; 5 - < 0,40 мг/л.

взвесью, хлорофилла "а" и органическим веществом. Во взвеси обнаружены единичные формы фитопланктона, в то время как в озере наблюдаются пики в его развитии.

Согласно проведенным исследованиям, получено, что как в июне, так и в августе основной слив из озера взвеси, органических веществ и биогенных элементов происходит в центральной и левобережной частях истока. Струя же подсоса озерных вод в реку меняется: в июне - это слой 0-50 м (рис. 17, а, б), в августе - в основном с 50 м (рис. 17, в, г).

Внешняя биогенная нагрузка Байкала

Избыток биогенных элементов (в первую очередь азота и фосфора) приводит к антропогенному эвтрофированию водоемов. Установление зависимости трофического уровня водоема от количества поступающих в него азота и фосфора привело к развитию так называемой нагрузочной концепции [Vollenweider, 1968; Vollenweider, Dillon, 1974; Dillon, 1975; Thomas et al., 1980;

Таблица 23. Элементы внешнего баланса биогенов, тыс. т/год

Статья баланса	Азот			Фосфор		
	сумма	органический	минеральный	сумма	органический	минеральный
Приход:						
приток с реками	$\frac{19,1}{10,4-25,6}$	$\frac{15,3}{8,0-23,8}$	$\frac{3,8}{1,9-6,2}$	$\frac{1,6}{1,5-1,7}$	$\frac{1,1}{1,0-1,2}$	$\frac{0,5}{0,47-0,52}$
с атмосферными осадками	$\frac{7,1}{5,9-8,3}$	$\frac{4,0}{3,9-4,0}$	$\frac{3,1}{2,0-4,2}$	$\frac{0,7}{0,6-0,8}$	$\frac{0,4}{0,3-0,5}$	$\frac{0,3}{0,25-0,35}$
Всего...	26,2	19,3	6,9	2,3	1,5	0,8
Расход:						
сток в Ангара	$\frac{9,6}{8,4-10,8}$	$\frac{6,6}{5,8-7,4}$	$\frac{3,0}{2,6-3,4}$	$\frac{1,1}{0,9-1,3}$	$\frac{0,5}{0,4-0,6}$	$\frac{0,6}{0,5-0,7}$
аккумуляция в озере	16,6	12,7	3,9	1,2	1,0	0,2

Примечание. В числителе - средние значения для азота с 1968 по 1987 г., для фосфора - с 1978 по 1987 г. В знаменателе - крайние значения за период исследований. Атмосферное поступление минеральных форм азота и фосфора - по данным К. К. Вогищева и др. /1987/; органические - средние за 1986, 1987 гг.

Таблица 24. Морфометрическая характеристика и некоторые показатели течения крупных озер мира /по: Dillon, 1975; Mathematical models ..., 1980; Свейн, 1985; Burns, 1976/

Озеро	Объем, км ³	Площадь, тыс. км ²		Максимальная глубина, м	Сток из озера, км ³	Высота над уровнем моря, м	Сумма ионов, мг/л	Р	N		С орг, мг/л	Хлоро- филл "а", мкг/л	Внешняя фосфорная нагрузка, т/(м ² ·год)
		озера	водосбо- ра						общ	мкг/л			
Байкал	23 000	31,5	540	1620	60,1	454	96	19*	180*	1,04*	0,64**	0,073	
Верхнее	11 600	82	128	400	69,7	184	-	5	-	1,20	1,00	0,049	
Мичиган	5760	57,8	239	281	160	177	107	9	-	-	2,00	0,95	
Гурон	4 600	59,6	-	229	-	177	96	5	-	-	1,20	0,065	
Онтарио	1 710	19	64	244	210	1,0	-	24	-	-	5,3	0,98	
Ладожское	908	17,67	258,6	230	75,5	5	62	27	600	8,4	2,5	0,32	
Эри	545	25,76	58,8	64	182	174	127	21-40	-	-	4,0-11	1,3	
Онежское	292	9,69	52,97	120	18,7	33	36	12	600	6,5	0,5-1,0	0,082	

* Средние значения за 1986-1989 гг. в толще вод 0-1300 м.

** То же, в слое 0-25 м.

Vollenweider et al., 1980/. Впервые количественную связь между внешней биогенной нагрузкой и трофическим уровнем водоема установил Фолленвайдер /Vollenweider, 1968/, затем она получила широкое развитие /Ostrovsky, 1978; Simons, Lam, 1980; Жукова, 1987; и др. /. Как правило, внешняя биогенная нагрузка складывается из поступления с речным стоком, с промышленными и хозяйственными сточными водами и из поступления с атмосферными осадками.

Рассмотрим основные элементы внешнего баланса биогенных элементов в Байкале (табл. 23). В приходной части баланса биогенных элементов нами определен их принос в озеро с притоками озера и атмосферой. Вынос азота и фосфора из озера происходит в основном с водами Ангары. Он составил в среднем за 1968–1987 гг. соответственно 9,6 тыс. т азота и 1,1 тыс. т фосфора /Галазий, Тарасова, 1989/. Как и в поступлении с речным стоком, органические формы азота и фосфора превышают вынос их минеральных форм. В последние же годы при неизменном стоке общего фосфора отмечается вынос равных количеств обеих форм фосфора. Для азота сохраняется преобладание выноса органических соединений над минеральными.

Из представленных материалов видно, что в озере аккумулируется от 50 до 70 % поступивших биогенных веществ. Внешняя биогенная нагрузка составляет по азоту 0,832, по фосфору – 0,073 г/м² в год. Сравнение внешней биогенной нагрузки Байкала с некоторыми крупными озерами мира показывает (табл. 24), что его внешняя фосфорная нагрузка близка к таковой для оз. Онежского и немного выше, чем в озерах Гурон и Верхнем.

Фито- и зоопланктон – автохтонные источники

Характерной чертой баланса ОБ в Байкале, как показано К. К. Вотинцевым /1975/, является преобладание в его приходной части автотрофного продуцирования, главным образом фитопланктоном, фитобентос играет второстепенную роль /Вотинцев, 1971а, б/. Отсюда понятно, насколько важно проведение исследований химического состава планктонных организмов. Для доминирующих форм фитопланктона Байкала известна лишь одна работа А. П. Виноградова /1939/, в которой приводится содержание углерода в мелозире от 18 до 36 %.

Известно, что химический состав фитопланктона не постоянен и зависит от вида водорослей и содержания веществ в воде /Йоргенсен, 1985/. Размах колебаний содержания в водорослях углерода (175–650 мкг/мг), азота (10–140 мкг/мг) и фосфора (0,5–33 мкг/мг) довольно высок (табл. 25).

Наши исследования по определению углерода, азота и фосфора в водорослях относятся к фитопланктону как открытых участков озера (в 1968 г. отловлено 10 проб мелозире байкальской, в 1969 г. – 10 проб синедры, в 1976 г. – 6 проб перидиней), так и прибрежной части (в 3 км от рек Мурино, Снежная, Бар-

Таблица 25. Элементный состав водорослей / по: Healey, 1973/

Элемент	Сухая масса, мкг/мг		Элемент	Сухая масса, мкг/мг	
	Среднее	Пределы колебаний		Среднее	Пределы колебаний
H	65	29–100	Ca	8,7	0,0–80
C	430	175–650	S	5,9	1,5–16
O	275	205–330	Fe	5,9	0,2–34
N	55	10–140	Zn	0,28	0,005–1,0
Si	54	0–230	B	0,03	0,001–0,25
K	17,3	1–75	Cu	0,10	0,006–0,3
P	11	0,5–33	Mn	0,06	0,02–0,24
Na	6,1	0,4–47	Co	0,06	0,0001–0,2
Mg	5,6	0,5–75	Mo	0,0008	0,0002–0,001

гузик, Голоустная, пос. Выдрино) в конце мая 1989 г., где на 98 % фитопланктон состоял из мелозир. Физиологическое состояние водорослей оценивали по отношению содержания каротиноидов к концентрации хлорофилла "а" ($C_{кар}/C_{хл. "а"}$) и пигментному индексу. Для 1968, 1969 и 1979 гг. они составляли соответственно 2,3 и 4, следовательно, можно считать, что состояние водорослей, которые отловлены в это время, было нормальное. Размах колебаний содержания углерода, азота и фосфора для мелозир, синедры и перидиней незначителен (табл. 26).

Содержание же углерода в мелозире 1989 г. составляло 170–690, азота – 80–200, фосфора 5–40 мкг/мг сухой массы. Столь широкий размах колебаний указанных выше величин и атомных отношений азота к фосфору (от 7 до 40) обусловлен, по-видимому, местом отлова мелозир (в воде отношение N:P изменялось от 5 до 30, а $C_{орг}$ – от 600 до 1270 мкг/л) и переменным отношением живых и мертвых клеток, о чем судили по повышенным значениям отношения $C_{кар}/C_{хл. "а"}$ (от 0,4 до 0,7) и пигментного индекса (4–10).

Зоопланктон, потребляя водоросли, бактерии и детрит, минерализует органическое вещество пищи и выделяет в водную среду биогенные элементы. Регенерация биогенных элементов, казавшаяся ранее простой, на самом деле осуществляется в сложной системе взаимодействия организмов и химических веществ, характер которого зависит от условий окружающей среды. Так, замечено в морях, что даже в период весенней вспышки развития фито- и зоопланктона концентрация фосфора часто остается постоянной. Если же зоопланктон по каким-либо причинам отсутствует, то снижение содержания фосфатов происходит очень резко /Гершанович и др., 1990/. Изучению участия ракообразных в метаболизме планк-

Водоросли	Время отбора	мкг/мг сухой массы					в атомах		
		C	N	P	C:N	C:P	N:P		
<i>Melosira baicalensis</i>	Весна 1968 г.	341±5	37,2±0,2	3,936±0,002	11	224	21	10	
<i>Synedra arcus</i>	Весна 1969 г.	186±4	22,0±0,15	6,480±0,004	9	74	7,5		
<i>Gymnodinium</i>	Зима 1979 г.	450±5	49,7±0,2	5,47±0,003	11	213	20		

тона в последнее время уделяется большое внимание /Гутельмахер, 1986; Жукова, 1987; и др. /. Для Байкала указанная проблема решается впервые, и она включала в себя определение содержания фосфора в одном из массовых видов зоопланктона озера — эпишуре байкальской — и изучение скорости экскреции фосфора рачками. Содержание фосфора в теле рачков *Epischura baicalensis*, отловленных сетью Джеди в районе Южного и Среднего Байкала в мае-июне 1989 г., составляло $1,29 \pm 0,45\%$ от сухой массы, что согласуется с результатами измерений концентрации фосфора у пресноводных и морских ракообразных /Peters, Rigler, 1973; Peters, 1975; Гутельмахер, 1986; и др. /.

Определение скорости экскреции фосфора эпишурой проведено в подледный (март) и осенний периоды (сентябрь 1989 г.) по разности концентраций фосфора с рачками и без них (контроль). Объем склянок, количество в них животных, а также время экспозиции зависели от чувствительности метода определения минерального фосфора. Для повышения чувствительности метода было использовано экстрагирование молибденовой сикни изопропанолом /Golterman, 1969/ с последующим спектрофотометрированием. Для исключения возможного потребления фосфора водорослями вода для опытов предварительно фильтровалась через мембранные фильтры. Влияние бактерий на скорость экскреции в течение 6 ч не отмечалось. Получено, что скорость экскреции фосфора 1 экз. эпишеры в сутки составляла 0,006 мкг, что соответствует данным Larow /1981/, Б. Л. Гутельмахера /1986/ для зоопланктона с длиной тела в 1,2 мм. Исходя из этих исследований, мы в дальнейших расчетах по определению роли зоопланктона в круговороте фосфора в Байкале использовали зависимость экскреции фосфора зоопланктоном от массы тела, установленную Б. Л. Гутельмахером /1986/.

Внутренняя биогенная нагрузка Байкала

Кроме поступления биогенных элементов с водосборного бассейна (внешняя биогенная нагрузка), режим азота и фосфора определяют внутриводоемные процессы (внутренняя биогенная нагрузка).

Элементами внутреннего баланса биогенных веществ являются аккумуляция поступивших с водосбора азота и фосфора, седиментация их в составе взвешенного материала, поток из донных отложений в воду и как следствие этих процессов — накопление их на дне.

Аккумуляция фосфора оценена нами по разности прихода и расхода как $0,038 \text{ г/м}^2$ в сут.

Исходя из потока седиментации извеси в озере, по данным К. К. Вотинцева /1967/ — 80 г/м^2 в год, из которых на долю $C_{\text{орг}}$ приходится в среднем 5 г/м^2 в год (3–4 г в неурожайные по фитопланктону годы и 8–11 г — в урожайные), рассчитан годовой поток седиментации фосфора, и он составил $0,085 \text{ г/м}^2$ в год. Поток фосфора из донных отложений в воду определили по разности между его седиментацией и аккумуляцией — $0,047 \text{ г/м}^2$ в год.

Исходя из средних значений первичной продукции ($100 \text{ г } C_{\text{орг}}/\text{м}^2$ в год) и отношения C:P в водорослях (40) /Redfield et al, 1963; Healey, 1973/, ассимилируется $2,0 \text{ г P/м}^2$ в год.

Оценка некоторых потоков фосфора, обеспечивающих первичную продукцию в озере

Валовая первичная продукция фитопланктона, $\text{г } C/\text{м}^2$ в год	100
Ассимиляция P, г/м^2 в год	2,0
Поступление P с бассейна озера с учетом потерь с водным стоком, г/м^2 в год	0,038
% от ассимиляции	1,9
Поступление P из донных отложений, г/м^2 в год	0,047
% от ассимиляции	2,35
Экскреция P зоопланктоном, г/м^2 в год	
max развития	1,23
min развития	0,32
% от ассимиляции	
max	60
min	16

Годовой приток фосфора в озеро с водосбора составляет 1,9 %, из донных отложений — 2,4 %.

Расчет потока фосфора, выделяемого водными животными, произвели исходя из биомассы зоопланктона при минимальном и максимальном его развитии /Афанасьева, 1977/ и установленной

Б. Л. Гутельмахером /1986/ зависимости скорости экскреции фосфора (E) от массы зоопланктона (W):

$$E = 1,047 \cdot W^{0,801}$$

Получено, что в период минимального развития рачков экскреция фосфора составила 16 %, а при максимальном она достигала 60 %.

Отметим, что расчеты, произведенные нами, очень ориентировочны. Принято, что все поступление биогенов с речным стоком распространяется равномерно по всей акватории озера, концентрация фосфора постоянна в толще вод озера, постоянно поступление его с притоками, а химический состав гидробионтов и взвешенного органического вещества подсчитывается как средние значения из литературных источников.

Тем не менее даже такие грубые допущения показали, что доля внешнего поступления фосфора (сумма речного стока и атмосферного приноса) в круговороте фосфора незначительна; ведущую роль играют внутриводные процессы.

Глава VI

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА, ХЛОРОФИЛЛА „а“ И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДАХ ОЗЕРА

Содержание органического углерода, которым характеризуется ОВ, в поверхностных нефитированных водах по акватории озера неоднородно, зависит от сезона года, развития доминирующих планктонных организмов и гидрологических особенностей вод озера. Оно увеличивается в период паводков в притоках и во время максимального развития фитопланктона (рис. 18). Аналогично изменению содержания общего количества C_{org} , а также взвеси (см. рис. 7) в воде изменяется C_{org} во взвеси (рис. 19). Относительное содержание C_{org} в общем количестве взвеси минимально в ноябре (7-12 %), максимально в сентябре (21-44 %) и в июне (18-30 %). Большую часть взвеси составляют минеральные частицы, доля которых в открытом озере повышается летом и зимой.

Для вертикального распределения концентрации C_{org} в нефитированных водах характерны несколько повышенные концентрации в верхнем 100-метровом слое и небольшое понижение с глубиной (рис. 20, табл. 28). Более резкое уменьшение с глубиной найдено для взвешенного C_{org} . Так, в поверхностных водах глубоководных станций у мысов Кадильного, Ухана и Елохина оно изменялось от 0,06 до 0,57 мг/л, на глубине 1400 и 1500 м — от 0,015 до 0,03 мг/л (см. рис. 20, б), что в основном обусловлено распадом ОВ, основная масса которого продуцируется в

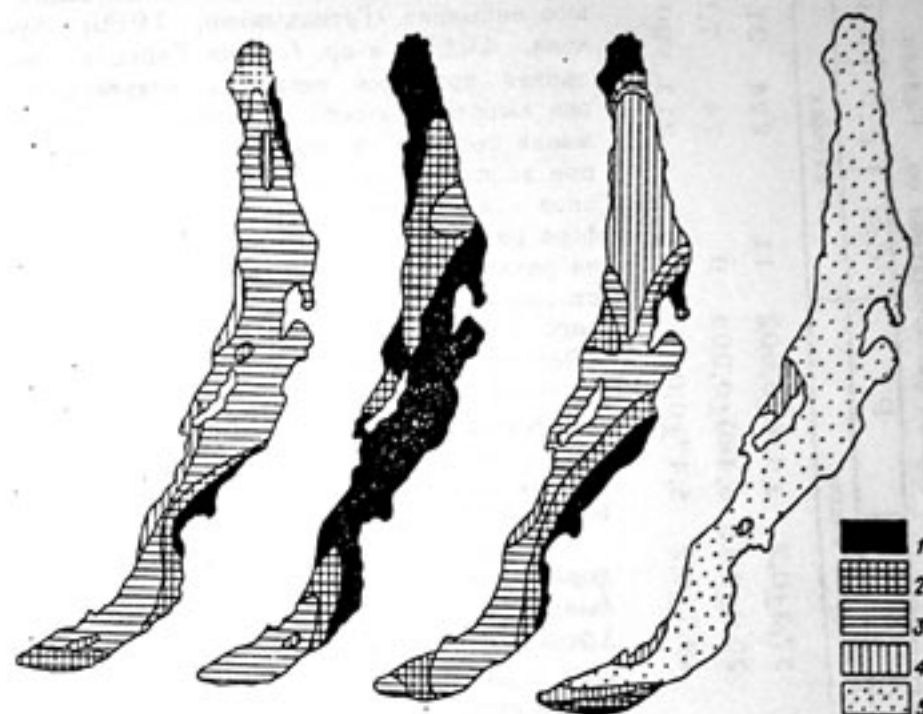


Рис. 18. Содержание C_{org} (мг/л) в поверхностных водах оз. Байкал в различные месяцы (VI-XI).

1 - > 1,60; 2 - 1,40-1,60; 3 - 1,20-1,40; 4 - 1,00-1,20; 5 - < 1,00.

трофогенном слое. Сезонное изменение содержания взвешенного C_{org} по вертикали есть результат трансформации ОВ во времени. В верхнем 200-метровом слое содержится "лабильное" ОВ (легко-разлагаемое), а ниже — "стабильное" ОВ (трудноразлагаемое), подтверждением чего является синхронное изменение биомассы фитопланктона (синедры), общего количества взвеси и взвешенного C_{org} по глубине (рис. 21).

В сезонных изменениях содержания C_{org} в нефитированных водах Байкала отмечено наличие двух максимумов (в апреле-мае и августе-сентябре) и двух минимумов (в январе-марте и июле), что обусловлено характером изменения в развитии планктонных организмов и особенностями гидрологического режима озера. Наиболее высокие значения содержания C_{org} (до 4,60 мг/л) наблюдаются в периоды развития перидиней. Процент летучей фракции ОВ наиболее высок в трофогенном слое (до 14 %), причем в периоды развития мелозеры он повышается до 18 /Тарасова, 1979/. Содержание C_{org} весной значительно изменяется от года к году: при массовом

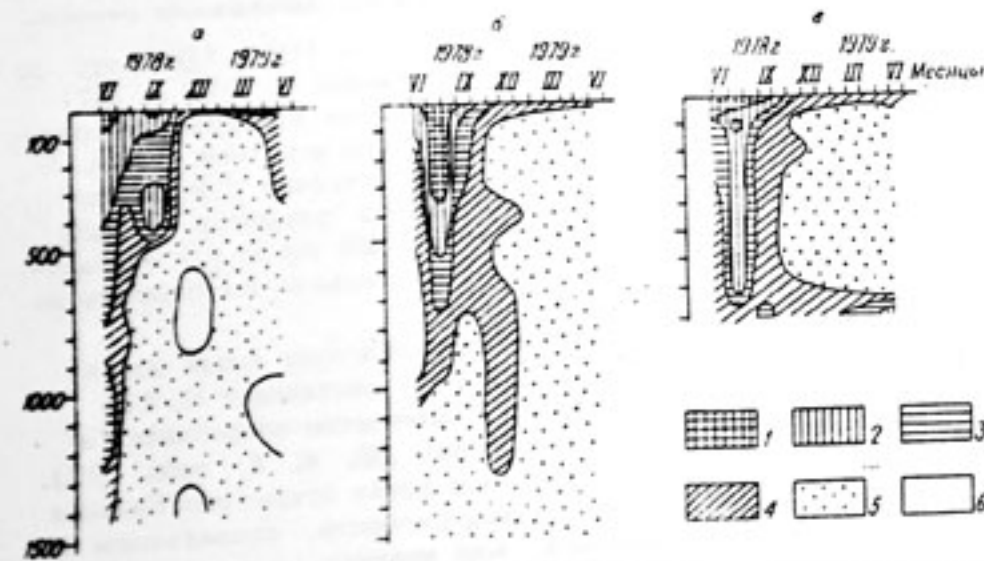
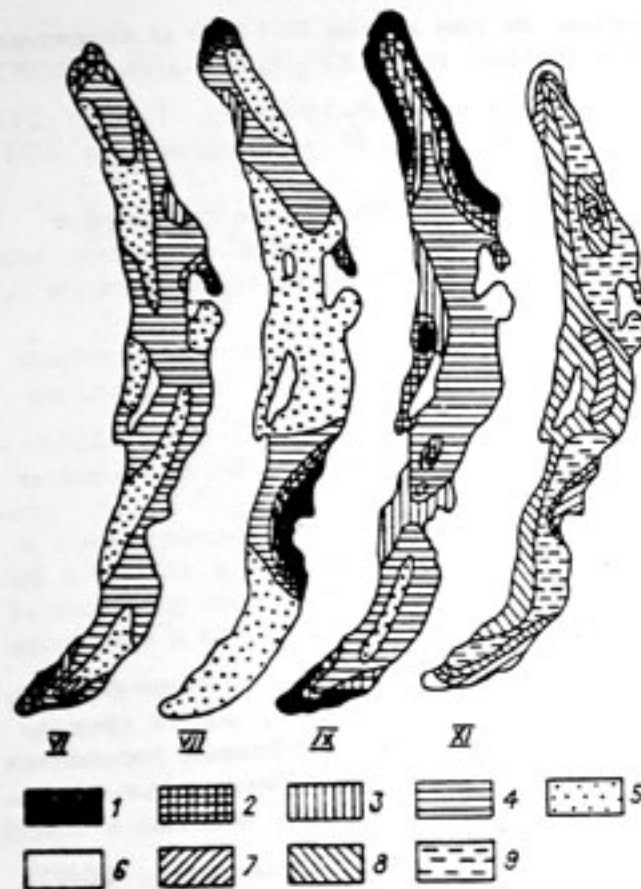
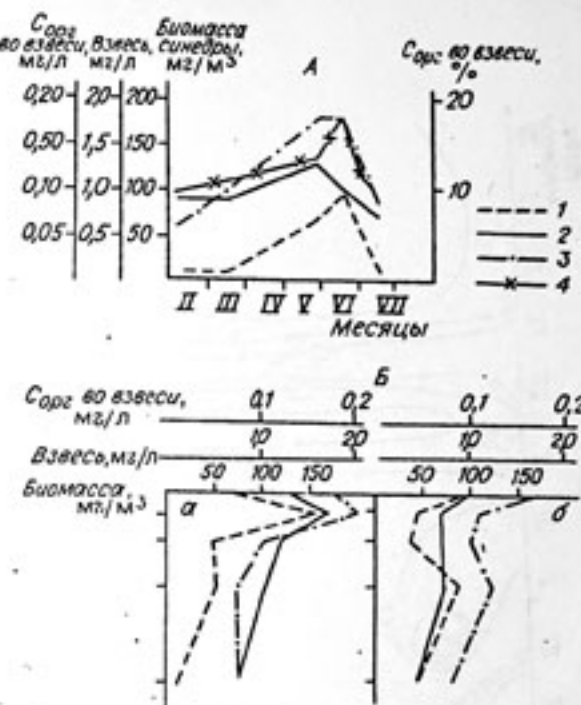


Рис. 20. Сезонные изменения содержания C_{org} (мг/л) в водах станций у мысов Кадильного (а), Ухан (б) и Елохин (в).
1 - >1,60; 2 - 1,40-1,60; 3 - 1,20-1,40; 4 - 1,00-1,20; 5 - 0,80-1,00; 6 - <0,80.

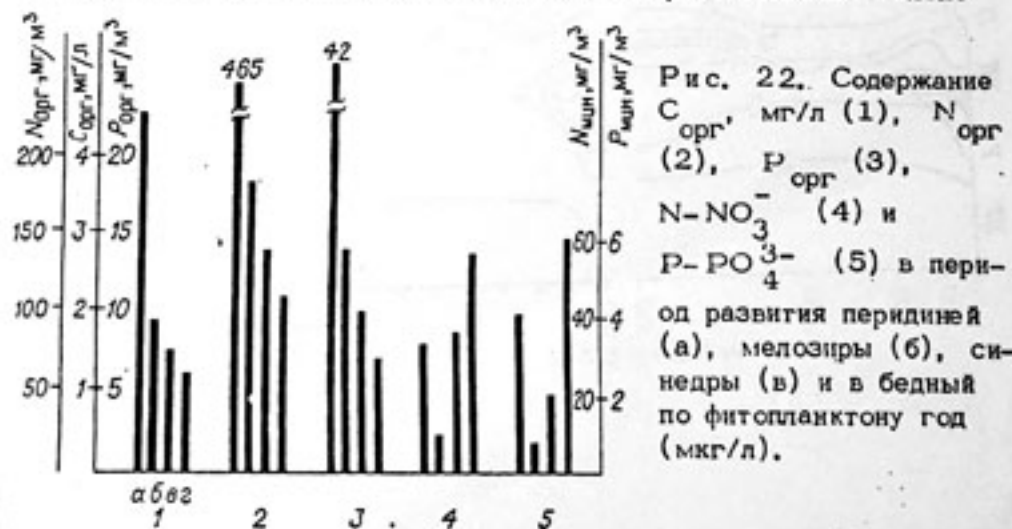
Рис. 21. Распределение биомассы синедры (1), общего количества взвеси (2) и C_{org} во взвеси (3 - в мг/л; 4 - в %) в открытых водах Южного Байкала по сезонам года на поверхности (А) и в 100-метровой толще вод (Б).



урожай перидиней оно достигает 4,60 мг/л, в "мелозирный" год - 1,85, в "синедровый" - 1,44 и в бедный по фитопланктону год - 1,20 мг/л (рис. 22).

Перманганатная и бихроматная окисляемость изменяются соответственно от 0,80 до 4,00 и от 3,2 до 13,5 мг O_2 /л. Характер их вертикальных распределений и сезонных изменений аналогичен таковым для C_{org} [Тарасова, 1972, 1975].

В последние годы в трофогенном слое отмечаются нарушения сезонной динамики содержания OB (рис. 23), которые заключались в отсутствии весеннего максимума и летнего минимума. Размах колебаний его значений на всех горизонтах значительно



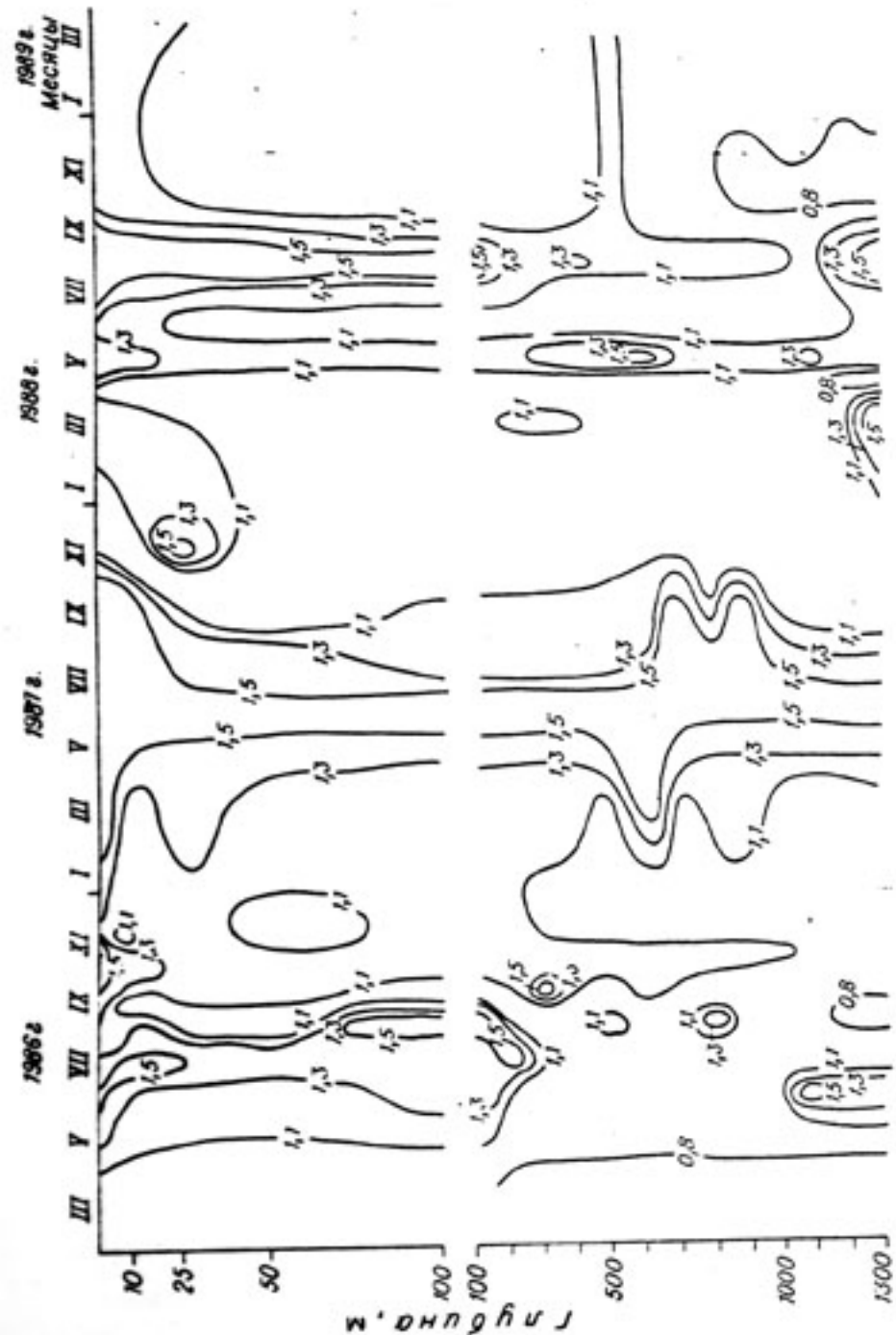


Рис. 23. Сезонное изменение содержания C_{org} (мг/л) в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинного).

увеличился, хотя в среднем за год в слое 0-1300 м концентрация C_{org} возросла незначительно: от $0,87 \pm 0,05$ мг/л в 1967-1969 гг. до $1,04 \pm 0,13$ мг/л в 1986-1989 гг. (табл. 27). Отношения $C:N$ не изменились, а $C:P$ уменьшились от 477 до 299 (табл. 28).

Более значительно увеличилось относительное содержание взвешенного органического вещества как в общем количестве взвеси (от 4 до 23 %), так и в общем количестве органического вещества (от 3 до 9 %) (табл. 29).

Существенные сезонные изменения претерпели и абсолютные значения содержания взвешенного C_{org} (рис. 24). Оно даже по средним значениям увеличилось от 44 ± 8 мкг/л в слое 0-1300 м в 1968-1969 гг. до 74 ± 68 мкг/л в 1986-1988 гг. Размах колебаний как в 1983-1984 гг., так и в 1986-1988 гг. также возрос (табл. 30). Характер вертикального распределения в толще вод 0-1300 м в 1968-1969 гг. отличен от такого в последующие годы. Если в 1968-1969 гг. отмечалось уменьшение концентрации C_{org} во взвеси с глубиной в 8 раз, то в последние годы она возрастала на глубинах 1100-1200 м до концентраций, близких к таковым в трофогенном слое (рис. 25, а), а средне-квадратическое отклонение его содержания в глубинных горизонтах нередко превышало такое в трофогенном слое. Максимальные значения взвешенного C_{org} в трофогенном слое были найдены в 1986-1988 гг. в зимний период (рис. 24), в то время как в 1967-1969 гг. это время характеризовалось минимальным содержанием C_{org} во взвеси [Тарасова, 1975]. Судя по уменьшению отношений $C:N$ во взвешенном веществе (от 13 в 1983-1984 гг. до 3 в 1986-1988 гг.) и $C:P$ (соответственно от 242 до 97) (табл. 31), изменение качественного состава взвешенного органического вещества произошло в сравнительно короткое время. Причиной описанных выше изменений, как показали результаты исследования сезонных изменений содержания сульфатов в толще вод глубоководной станции, находящейся в 20 км от г. Байкальска (в Южном Байкале), было более значительное поступление загрязняющих веществ с БЦБК.

Концентрация хлорофилла "а" в поверхностных водах озера (по систематическим многолетним данным) составляет $0,11-3,14$ мкг/л, с увеличением глубины количество хлорофилла "а" уменьшается до $0,00-1,31$ мкг/л (рис. 26, а, б, табл. 32).

В течение года в слое до 100 м в водах открытого Байкала отмечаются два максимума содержания пигмента, совпадающие с периодами развития фитопланктона. Как правило, в периоды гомотермии (весной и осенью) повышенные значения хлорофилла "а" наблюдаются и в глубинной области (рис. 26, а).

По акватории озера концентрация хлорофилла "а" неоднородна. Для открытой части озера в июне коэффициент корреляции между

Таблица 27. Вертикальное распределение содержания C_{org} в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинного), мг/л

Глубина, м	1967-1969 гг.		1983-1985 гг.		1986-1989 гг.	
	среднее	min-max	среднее	min-max	среднее	min-max
0	1,18	1,00-1,35	1,34	0,90-2,09	1,31	0,88-2,10
5	-	-	-	-	1,20	0,90-1,81
10	1,12	0,88-1,43	1,41	0,88-2,53	1,25	0,90-1,95
25	1,06	0,88-1,25	1,29	0,78-2,28	1,11	0,83-1,70
50	1,01	0,76-1,20	1,08	0,74-1,70	1,12	0,87-1,65
100	0,96	0,72-1,18	1,07	0,62-1,49	1,18	0,86-1,64
200	0,96	0,73-1,18	1,03	0,62-1,42	1,15	0,75-1,74
300	0,94	0,72-1,24	1,08	0,62-1,66	1,12	0,75-1,72
400	0,87	0,72-1,01	1,02	0,54-1,85	1,05	0,71-1,72
500	0,84	0,72-1,00	1,07	0,62-1,49	1,00	0,60-1,46
600	0,83	0,72-0,93	1,03	0,64-1,34	1,11	0,75-1,52
700	0,85	0,69-1,20	1,05	0,73-1,40	1,02	0,78-1,46
800	0,83	0,69-1,08	0,95	0,62-1,55	0,97	0,75-1,46
900	0,81	0,69-0,93	0,98	0,62-1,89	0,99	0,75-1,49
1000	0,81	0,70-0,93	0,92	0,64-1,41	0,94	0,60-1,25
1100	0,81	0,69-0,93	0,98	0,62-1,53	1,00	0,67-1,49
1150	0,79	0,69-0,99	-	-	-	-
1200	0,79	0,69-0,90	1,09	0,62-1,83	0,91	0,55-1,35
1250	0,78	0,69-0,90	-	-	-	-
1300	0,79	0,72-0,90	1,28	0,79-2,43	0,95	0,60-3,40

Среднее в слое 0-1300 м $0,87 \pm 0,05$ $1,04 \pm 0,18$ $1,04 \pm 0,13$

Таблица 28. Изменения отношений биогенных элементов по вертикали в органическом веществе вод Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинного), ат.

Глубина, м	C:N		C:P		N:P	
	1967-1969 гг.	1986-1989 гг.	1967-1969 гг.	1986-1989 гг.	1967-1969 гг.	1986-1989 гг.
1	2	3	4	5	6	7
0	11	8	339	242	30	29
10	11	10	362	230	34	23
25	11	13	342	319	30	24
50	11	12	372	322	33	26
100	11	11	354	381	30	34
200	12	14	412	381	35	27
300	12	10	486	289	41	28

Окончание табл. 28

1	2	3	4	5	6	7
400	12	10	562	339	47	34
500	12	14	435	287	37	20
600	12	15	536	409	44	26
700	13	11	549	293	43	26
800	13	13	536	313	42	24
900	13	14	523	320	40	23
1000	14	13	696	270	49	20
1100	9	16	523	235	38	14
1200	14	7	679	214	47	32
1300	14	10	679	245	47	24

Среднее в слое 0-1300 м 12 12 477 299 44 25

Таблица 29. Относительное содержание взвешенного C_{org} от общего количества взвеси (1) и общего количества C_{org} (2) в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинного)

Глубина, м	1968, 1969 гг.		1983, 1984 гг.		1986-1988 гг.	
	1	2	1	2	1	2
0	12,0	10,3	7,6	6,2	11,9	10,5
5	-	-	-	-	9,7	9,3
10	12,5	8,9	7,2	5,5	11,9	11,1
25	11,2	7,8	11,0	7,4	11,6	10,0
50	10,5	7,8	12,4	7,6	14,0	10,3
100	8,4	5,4	16,1	6,9	16,3	9,0
200	7,8	2,8	8,2	3,9	8,6	5,5
300	6,4	-	11,0	5,1	10,8	7,5
400	4,8	-	9,4	4,7	10,2	5,1
500	4,5	-	5,7	8,6	21,8	10,9
600	1,5	2,2	12,3	5,7	15,4	6,7
700	1,1	1,4	9,8	4,3	25,7	7,6
800	1,5	3,2	8,6	3,8	20,4	10,1
900	1,3	4,4	10,5	3,4	25,0	11,1
1000	1,0	2,3	18,0	8,2	16,1	10,4
1100	2,8	-	13,7	6,4	-	14,5
1200	1,2	-	21,3	9,4	8,4	6,5
1300	3,1	1,5	20,0	7,1	27,3	15,0

Среднее в слое 0-1300 м 4 3 12 6 23 9

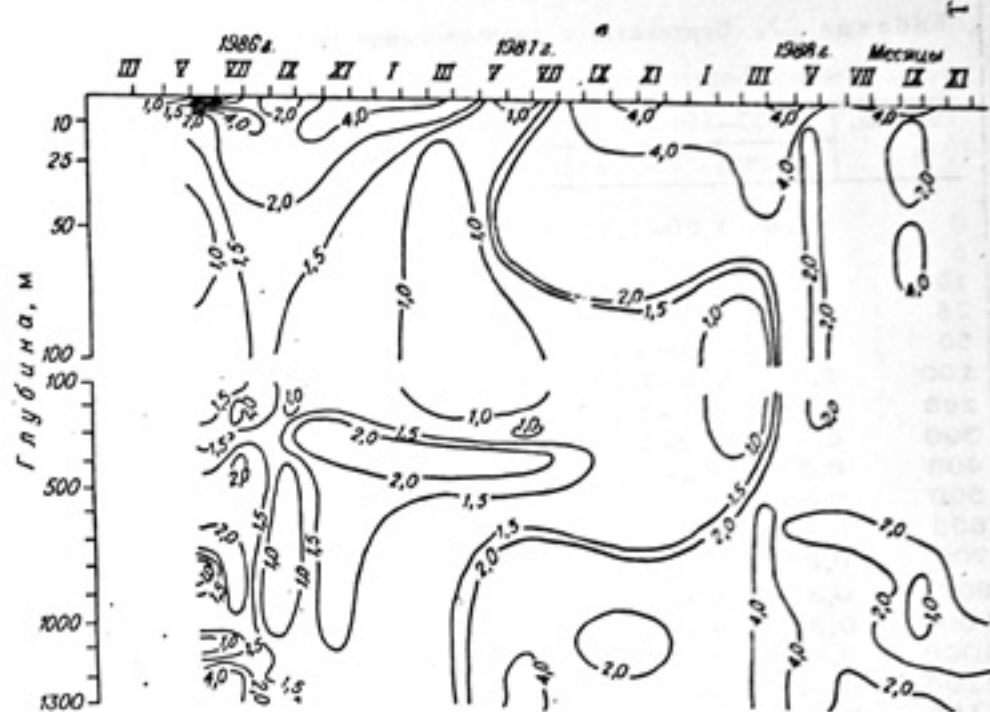
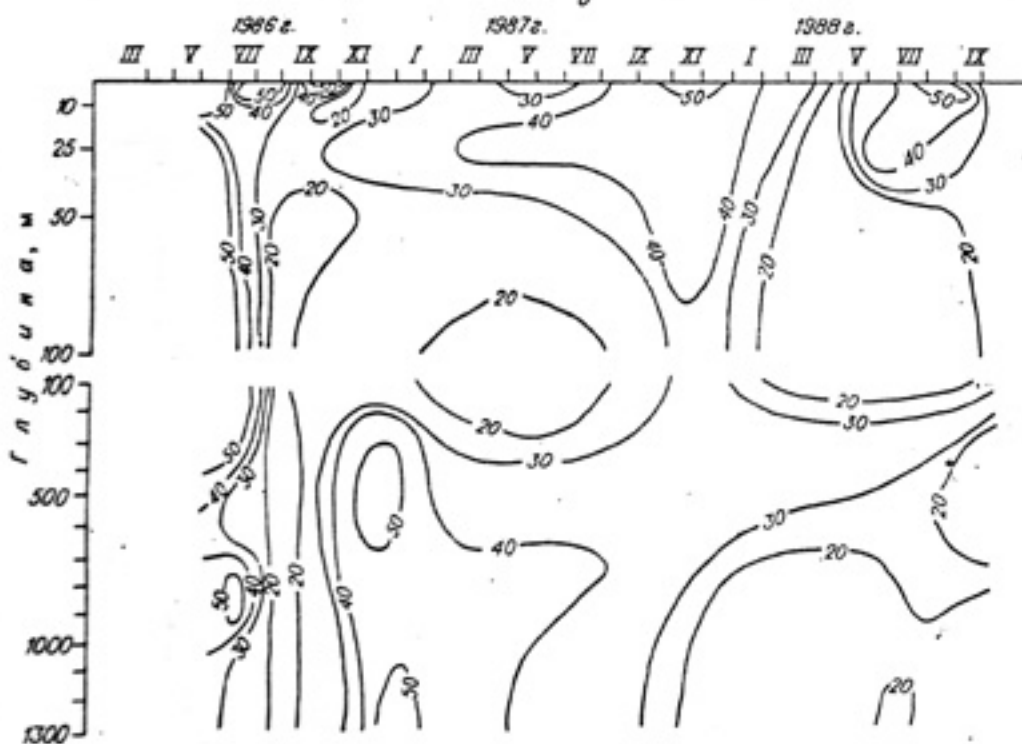
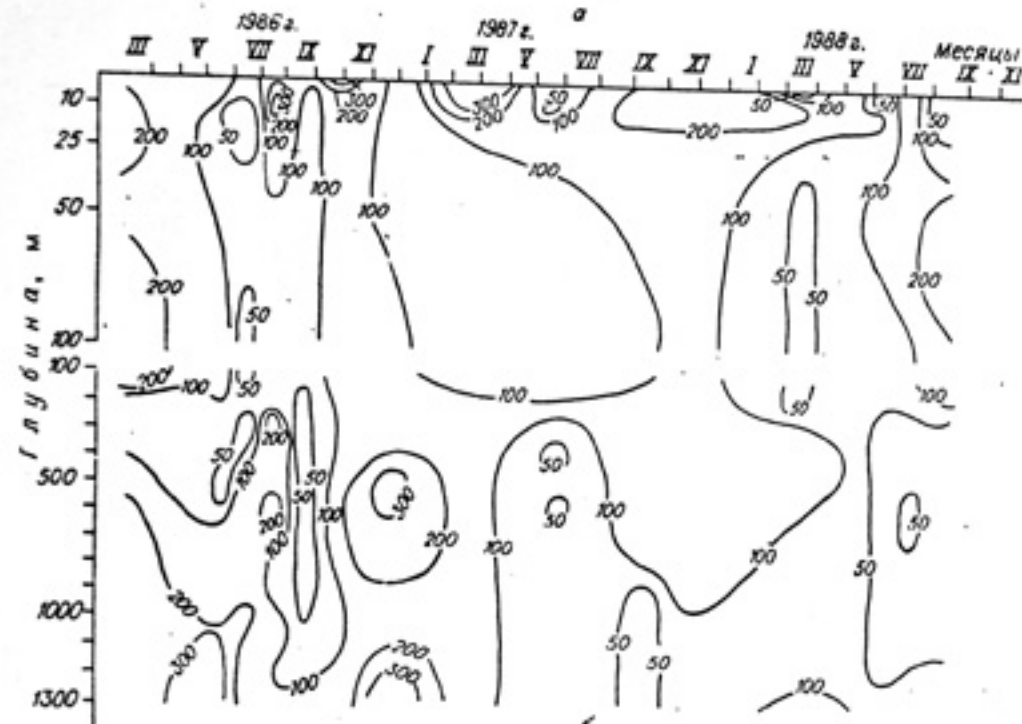


Рис. 24. Сезонные изменения элементарного состава взвешенного ОВ (мкг/л) в водах Южного Байкала.

а - C_{org} ; б - N_{org} ; в - P_{org} .

взвесью и хлорофиллом "а" составляет $0,74 \pm 0,09$, в прибрежной части - $0,08 \pm 0,18$. В марте между указанными компонентами найдена обратная зависимость как для открытой части озера ($-0,44$), так и для прибрежной ($-0,79$).

Относительное содержание хлорофилла "а" во взвешенном ОВ с глубиной уменьшается:

Глубина, м	1983, 1984 гг.	1986-1988 гг.
0	0,48	0,36
5	-	0,35
10	0,85	0,23
25	0,64	0,19
50	0,43	0,11
100	0,12	0,13
200	0,13	0,11
300	0,25	0,10
400	0,34	0,06
500	0,23	0,07
600	0,08	0,12

Таблица 30. Вертикальное распределение $C_{орг}$ во взвеси вод Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинного), мкг/л

Глубина, м	1968, 1969 гг.		1983, 1984 гг.		1986-1988 гг.	
	среднее	min-max	среднее	min-max	среднее	min-max
0	142	90-200	83	40-174	137	13-340
5	-	-	-	-	111	6-382
10	118	50-210	78	56-126	139	13-336
25	98	40-210	95	14-166	111	36-270
50	78	40-170	82	14-222	115	28-279
100	64	30-160	74	16-123	106	12-294
200	53	3-100	40	14-87	63	13-121
300	44	20-90	53	15-163	84	13-253
400	36	20-80	48	12-83	53	20-113
500	31	15-80	28	17-55	109	13-310
600	24	15-40	59	11-189	74	6-226
700	19	15-30	45	14-154	77	25-140
800	25	15-60	36	14-61	98	57-172
900	26	15-50	43	14-114	110	5-271
1000	15	15-20	75	47-174	98	32-152
1100	18	15-30	63	18-174	-	-
1200	15	15-20	102	61-142	59	6-121
1300	17	15-20	92	56-122	142	25-375

Среднее
в слое
0-1300 м 44 ± 8 58 ± 49 74 ± 68

Глубина, м	1983, 1984 гг.	1986-1988 гг.
700	0,07	0,07
800	0,14	0,05
900	0,15	0,03
1000	0,03	0,06
1100	-	0,05
1200	0,06	0,21
1300	-	0,04

Коэффициент корреляции между взвешенным ОВ и хлорофиллом "а" в 1986-1988 гг. очень низок как по вертикали (0,05), так и в слое 0-10 м (0,14). В 1983-1984 гг. по вертикали (по средним значениям) он был несколько выше (0,56), хотя связь между взвешенным ОВ и хлорофиллом "а" очень слабая. Очень слабая она и между общим количеством взвешенных веществ и

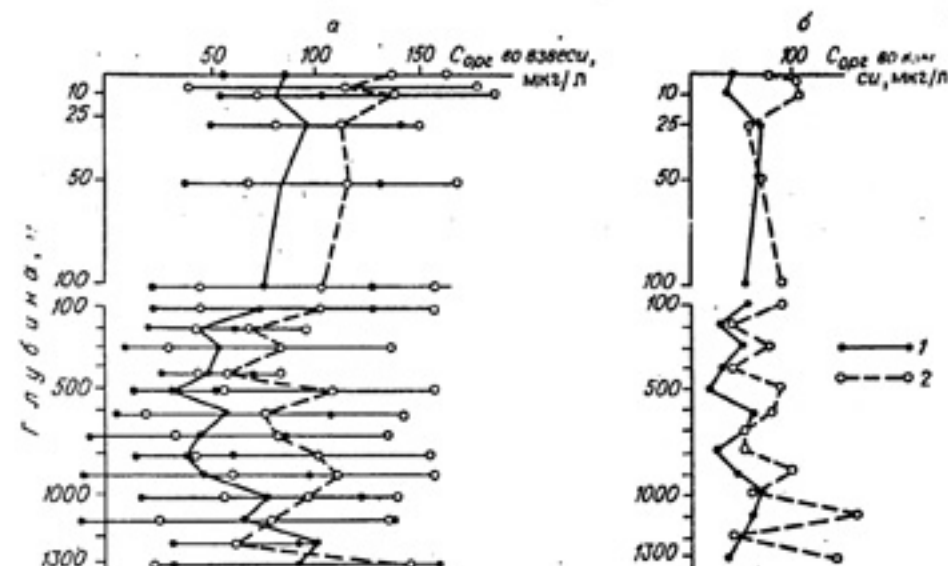


Рис. 25. Содержание (а) $C_{орг}$ во взвеси и его среднеквадратическое отклонение (б) на разных глубинах Южного Байкала в 1983, 1984 (1) и 1986-1988 (2) гг.

Таблица 31. Изменение отношений C:N, C:P и N:P во взвешенном органическом веществе по вертикали в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинного), ат.

Глубина, м	C : N		C : P		N : P	
	1983-1984 гг.	1986-1988 гг.	1983, 1984 гг.	1986-1988 гг.	1983, 1984 гг.	1986-1988 гг.
	2	3	4	5	6	7
0	8	6	115	110	14	19
5	-	4	-	69	-	19
10	11	6	217	83	19	13
25	19	4	264	120	14	29
50	15	6	195	126	13	20
100	20	7	206	158	10	21
200	10	2	133	94	14	47
300	18	4	126	113	7	31
400	9	2	133	76	16	32
500	7	4	78	123	11	30
600	21	4	246	105	12	24
700	14	3	125	113	9	36
800	7	7	-	126	-	19
1000	6	3	179	131	32	39

Окончание табл. 31

1	2	3	4	5	6	7
1000	24	6	208	157	9	28
1100	6	11	175	336	28	30
1200	-	6	-	56	-	9
1300	12	6	511	113	43	20
Среднее в слое 0-1300 м	13	3	242	97	19	29

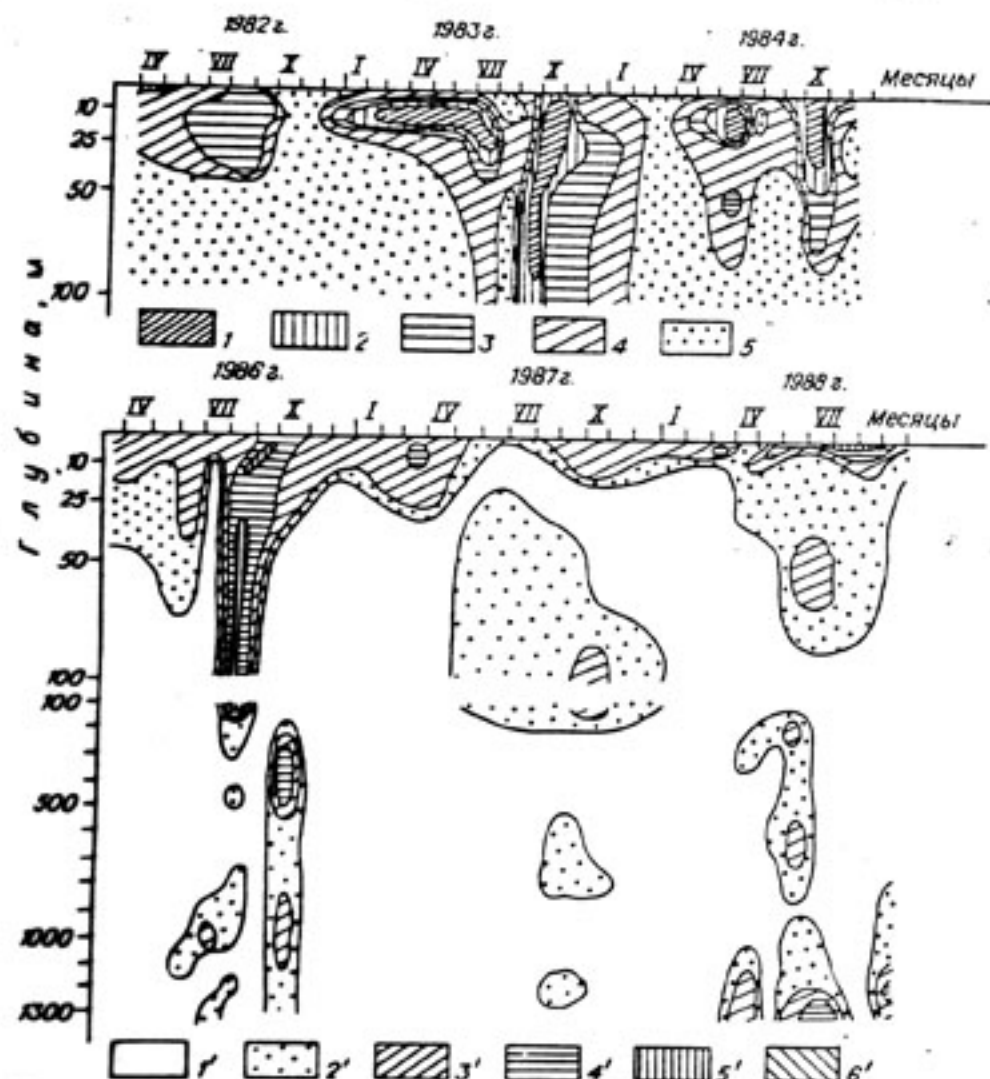


Рис. 26. Сезонная концентрация хлорофилла "а" (мкг/л) в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинный).

1 - > 2,0; 2 - 1,5-2,0; 3 - 1,0-1,5; 4 - 0,5-1,0;
5 - < 0,5; 1' - < 0,2; 2' - 0,2-0,5; 3' - 0,5-1,0; 4' - 1,0-1,5; 5' - 1,5-2,0; 6' - > 2,0.

Таблица 32. Вертикальное распределение содержания хлорофилла "а" в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинного), мкг/л

Глубина, м	1983-1985 гг.		1986-1989 гг.	
	среднее	min-max	среднее	min-max
0	0,88	0,11-1,80	0,98	0,23-3,14
5	-	-	0,77	0,18-1,73
10	1,33	0,20-3,84	0,65	0,05-1,60
25	1,22	0,36-4,00	0,43	0,02-1,42
50	0,70	0,15-3,00	0,26	0-0,82
100	0,17	0,02-0,60	0,27	0-1,93
200	0,10	0,06-0,16	0,14	0-0,51
300	0,26	0-0,86	0,17	0-1,35
400	0,33	0-1,02	0,06	0-0,19
500	0,13	0-0,36	0,15	0-1,10
600	0,10	0-0,25	0,17	0-0,87
700	0,06	0-0,08	0,11	0-0,50
800	0,10	0-0,25	0,10	0-0,23
900	0,13	0-0,21	0,07	0-0,21
1000	0,04	0-0,07	0,12	0-0,65
1100	-	-	0,13	-
1200	0,13	0-0,15	0,25	0-0,47
1300	-	-	-	-
Среднее в слое 0-1300 м	0,19±0,15		0,16±0,11	

хлорофиллом "а" на 0-0,5 м (0,03) и на 5 м (0,33). Из этого следует, что повышение взвешенного органического вещества в 5 раз в последние годы обусловлено не развитием фитопланктона, а поступлением с берега, что подтверждается распределением содержания сульфатов в толще воды по сезонам года в 1986-1989 гг.

Биогенные элементы распределяются по акватории озера неравномерно, для их содержания характерны четко выраженная вертикальная стратификация и регулярные сезонные изменения.

Из неорганических соединений азота и фосфора в водах открытого Байкала постоянно присутствуют лишь азот нитратов и фосфатный фосфор. Нитритный азот в 50-х годах появлялся лишь эпизодически в количествах не свыше 0,001-0,003 мг/л в периоды отмирания фитопланктона при его массовой вегетации; в 70-80-х годах в трофогенном слое, а иногда и на глубине он встречается все чаще и чаще. Аммонийный азот в толще вод в прежние годы вообще отсутствовал; появлялся он в придонных слоях воды и в грунтовых растворах, где его содержание достигало иногда 1,0 мг/л и более. В последние годы он отмечается и в водах открытого озера, причем концентрация иногда достигает 8-10 мкг/л.

Распределение содержания N и P в поверхностном слое по акватории озера (рис. 27, а, б; 28, а, б) определяется сезо-



Рис. 27. Распределение азота (мкг/л) в поверхностном слое по акватории озера в отдельные месяцы.

а - $N-NO_3$: 1 - < 10 , 2 - 10-20, 3 - 20-40, 4 - 40-60, 5 - 60-80, 6 - > 80 ; б - органического азота: 1 - > 200 , 2 - 150-200, 3 - 120-150, 4 - 100-120, 5 - 80-100, 6 - < 80 .

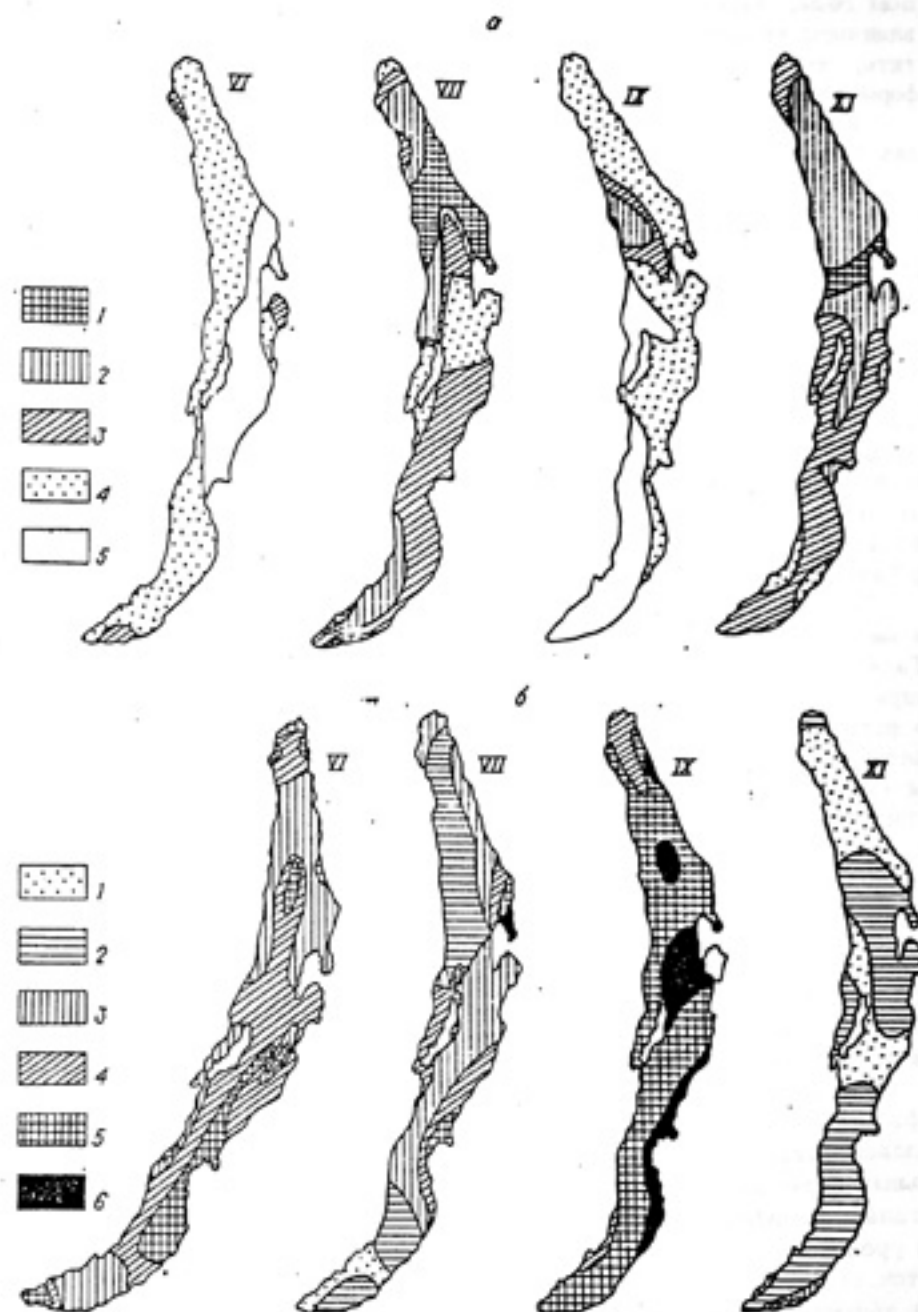


Рис. 28. Содержание фосфора (мкг/л) в поверхностном слое по акватории озера в отдельные месяцы.

а - $P-PO_4^{3-}$: 1 - > 10 , 2 - 7-10, 3 - 5-7, 4 - 3-5, 5 - < 3 ; б - P_{org} : 1 - < 8 , 2 - 8-10, 3 - 10-12, 4 - 12-15, 5 - 15-18, 6 - > 18 .

ном года, неравномерностью развития планктонных организмов, влиянием внешних источников поступления в озеро. Следует отметить, что, как правило, повышенным концентрациям органических форм азота и фосфора соответствуют низкие значения минеральных. Изменчивость концентраций N и P в течение суток в водах открытого озера незначительна /Тарасова, 1977/.

По сезонам максимум содержания нитратного азота и фосфатного фосфора приурочен к зимнему периоду, при этом концентрация азота в верхних слоях воды достигает 80 мкг/л, а фосфора - 10 мкг/л. Вертикальная стратификация этих компонентов в рассматриваемый период выражена наименее четко (рис. 29, а, б; 30, а, б).

С началом развития весеннего фитопланктона содержание N и P в трофогенном и прилежащих к нему слоях воды снижается. Размеры этого снижения в разные годы различны и зависят от доминирующих форм фитопланктона. Характерным для озера является массовое развитие весной одного из следующих видов фитопланктона: мелозир, синедры или перидиней. В связи с этим введены термины: "мелозирный", "синедровый", "перидиниевый" и бедный по фитопланктону годы /Поповская, 1971, 1986/.

Содержание нитратов и фосфатов в "перидиниевый" год снижается не очень резко и они остаются в концентрациях 49 и 7 мкг/л /Тарасова, 1986/. В год повышенного развития численности синедры нитраты и фосфаты составляют 36 и 4 мкг/л, а в бедный по фитопланктону год - 56 и 6 мкг/л. В год массового развития мелозир минимум этих биогенных элементов бывает более глубокий (до 23 и 1 мкг/л) и продолжительный (см. рис. 22). Интересно, что количество нитратов, предшествующее развитию мелозир, наибольшее (80 мкг/л), в то время как в другие годы оно не превышает 50-60 мкг/л, фосфаты же изменяются при этом незначительно - 6-8 мкг P/л.

После освобождения озера ото льда начинается обогащение трофогенного слоя соединениями биогенных элементов, происходящее как за счет их поступления из глубинных слоев воды в связи с усилением водообмена, так и за счет регенерации при разложении отмершего планктона (см. рис. 29, а; 30, а).

Одновременно с восстановлением запасов нитратов и фосфатов в трофогенном слое в мае-июне идет их потребление развивающимся здесь фитопланктоном. Поэтому повышение концентраций минеральных форм азота и фосфора, достигающее максимума в июле (летний максимум), как правило, проходит на несколько более низком уровне по сравнению с зимой. Содержание нитратов не поднимается выше 70 мкг/л, фосфатов - 5 мкг/л. В конце июля - начале августа и уже через месяц содержание нитратов в верхнем 10-метровом (иногда 25-метровом) слое уменьшается до аналитического нуля, фосфатов - до 4 мкг/л.

Летний максимум не только более глубокий, но и более продолжительный, чем весенний. Он длится обычно 2 мес, причем формированию его во многом способствует температурное рассло-

ение толщи вод Байкала. Это отчетливо проявляется в вертикальном распределении нитратов и фосфатов, концентрация которых в период поверхностного минимума уже на глубине 50 м оказывается весьма высокой и нередко приближается к зимним показателям.

В осенний период их содержание в поверхностных слоях вновь возрастает.

Вертикальное распределение содержания рассматриваемых компонентов характеризуется возрастанием с глубиной, причем наибольший градиент приурочен к верхнему 100-метровому слою (рис. 31, а, 32, а; табл. 33).

Содержание органических соединений N и P в водах Байкала существенно изменяется в течение года (см. рис. 29, б; 30, б). Максимальные их концентрации отмечаются в верхних слоях и резко снижаются с глубиной. Так, если содержание N_{org} в поверхностном слое колеблется в пределах 114-460 мкг/л, а P_{org} - 3-40 мкг/л, то на глубине 1400 м пределы этих колебаний соответственно равны 46-80 и 2-7 мкг/л (см. табл. 33).

Сезонная изменчивость содержания рассматриваемых компонентов, наиболее отчетливо проявляющаяся в верхнем 100-метровом слое воды, обратна изменчивости их неорганических форм (см. рис. 29, б; 39, б). Максимум содержания органических форм азота и фосфора отмечается весной и составляет в "перидиниевый" год соответственно до 460 и 40 мкг/л, в "мелозирный" - до 180 и 14 мкг/л, в "синедровый" - до 140 и 10 мкг/л, в бедный по фитопланктону год - 110 и 7 мкг/л (см. рис. 22). При развитии перидиней указанный максимум приходится на март-апрель, мелозир и синедры - на апрель-май. Это связано с тем, что максимум численности перидиней отмечается в подледный период, мелозир же и синедры - после вскрытия озера ото льда. Особенности распределения указанных видов водорослей в толще воды объясняются и наблюдаемые максимумы органических форм азота и фосфора в "перидиниевый" год в поверхностном слое, а в "мелозирный" и "синедровый" годы - на глубине 10 м.

В годы массового развития перидиней высокому содержанию органических форм азота и фосфора соответствует достаточно высокое содержание их минеральных форм, что вызвано, вероятно, скоплением перидиней в трещинах льда.

Отношения биогенных элементов в среднем за год в слое 0-1300 м для минеральных форм составляют 18, для органических - 44, для общих - 25 (табл. 34). С глубиной они уменьшаются, для органических же форм, напротив, наблюдается их увеличение, что указывает на более высокую по сравнению с азотом скорость минерализации органических форм фосфора.

Как и для содержания сульфатов (см. рис. 6), в глубинных водах для концентрации азота и фосфора найдены максимальные значения. Среднеквадратическое отклонение их содержания на этих горизонтах приближается, а порой и выше такового в трофогенном слое (рис. 33, а-г).

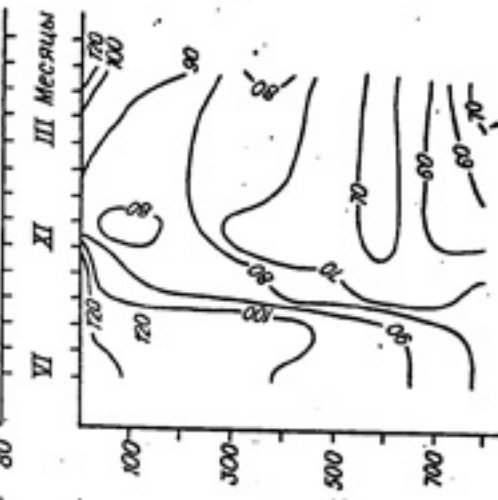
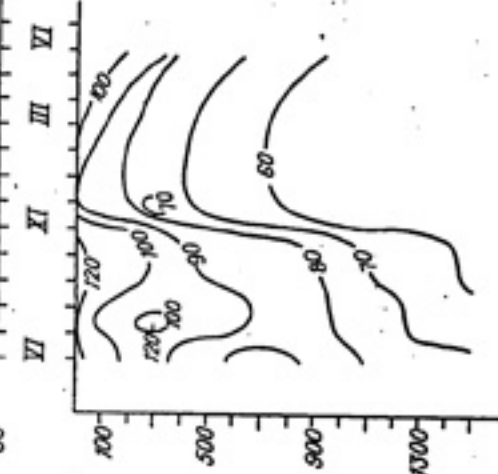
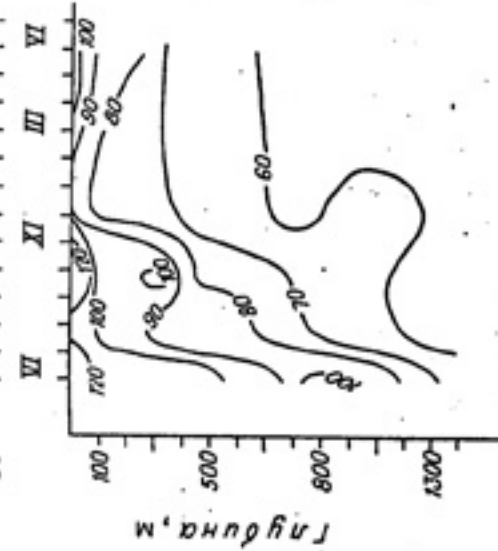
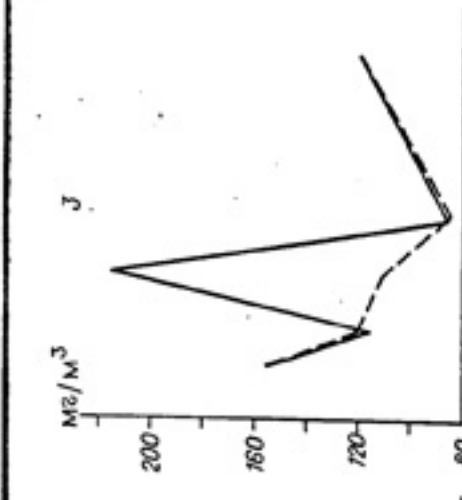
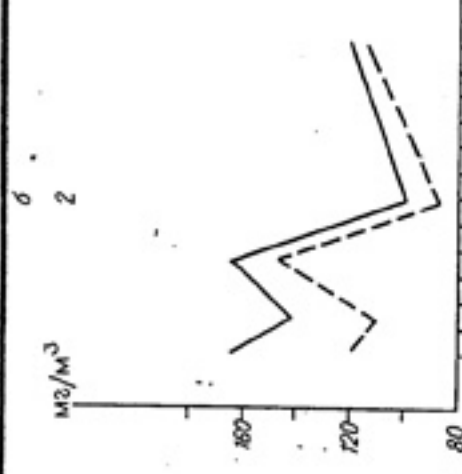
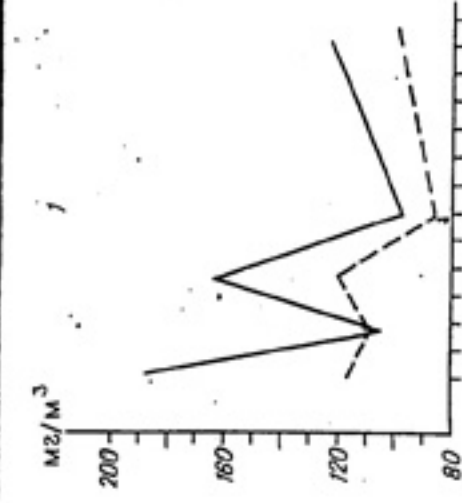
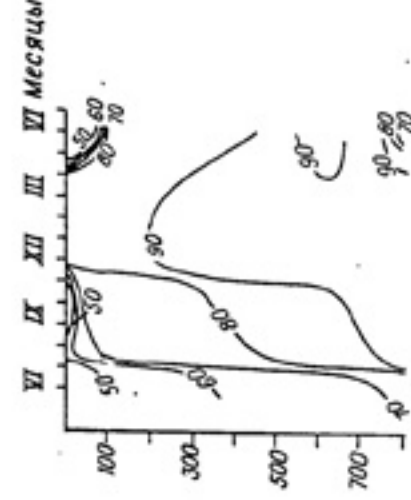
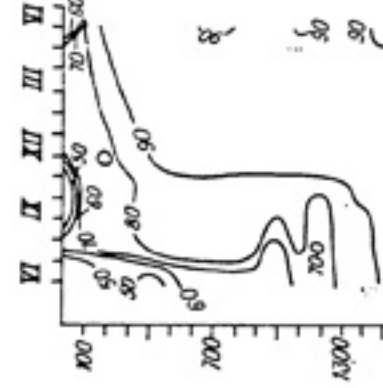
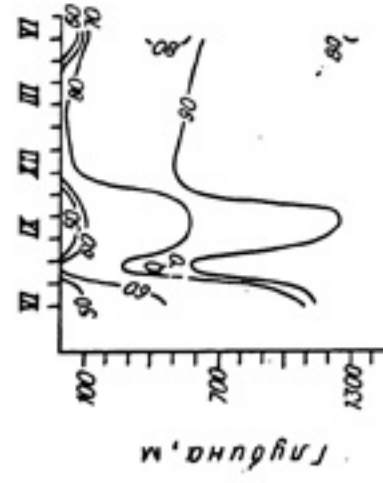
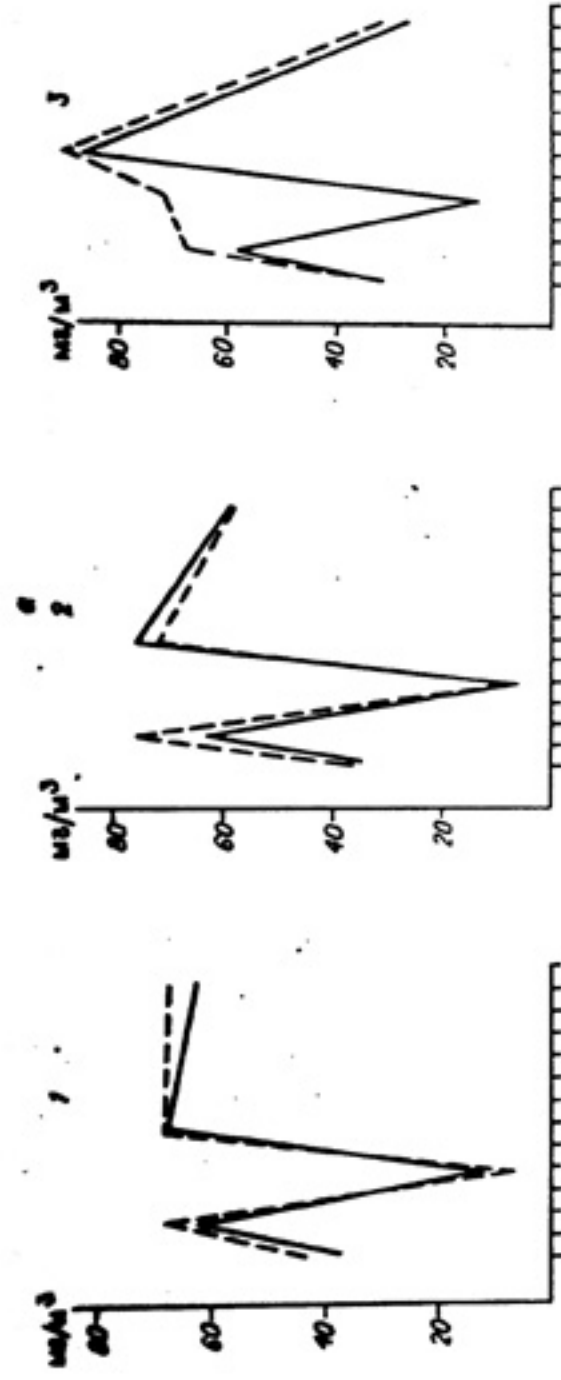


Рис. 29. Сезонные изменения содержания $N-NO_3^-$ (а) и N_{org} (б) в водах станций у мысов Кадиль-
 ный (1), Ухай (2) и Елохин (3).

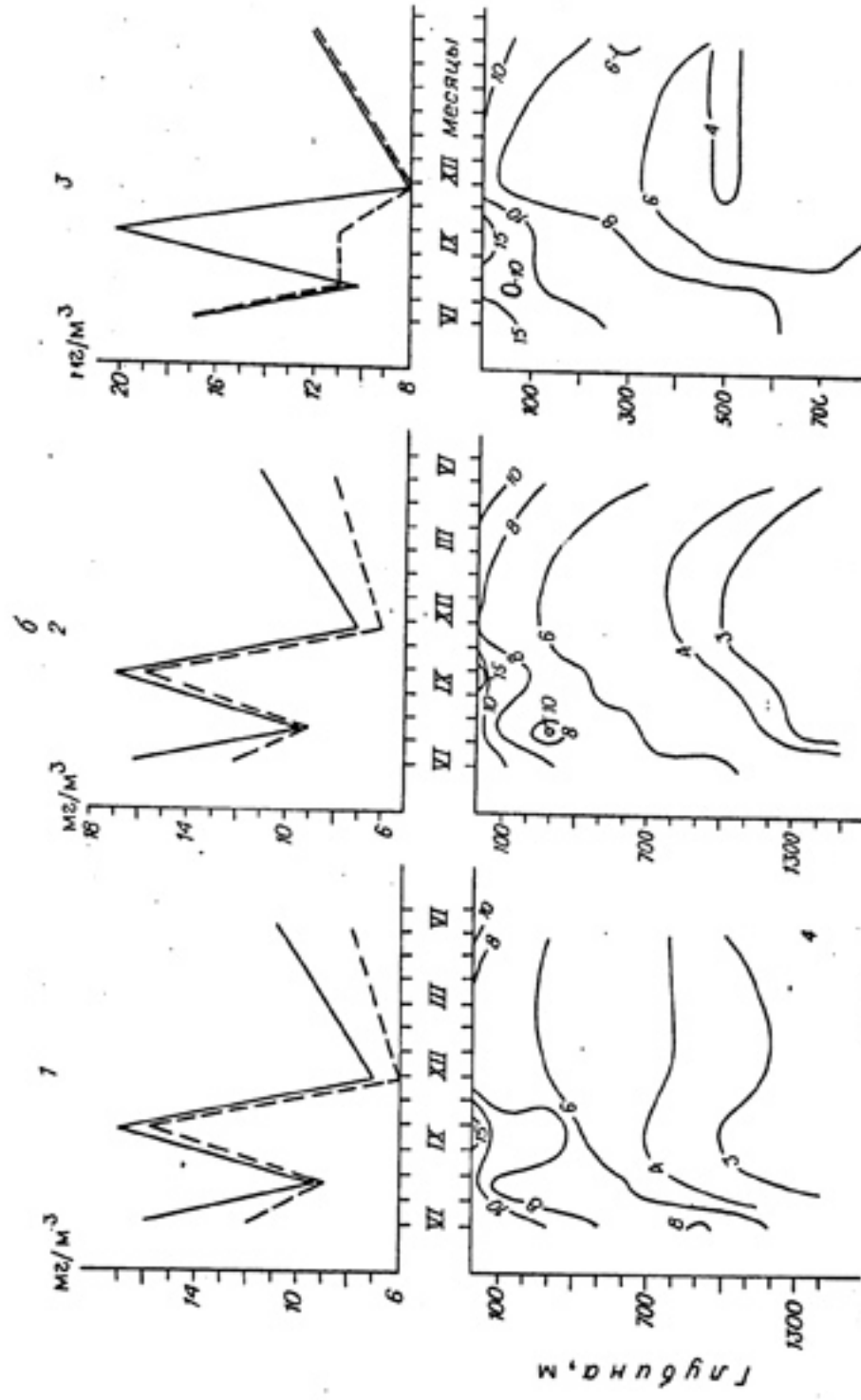
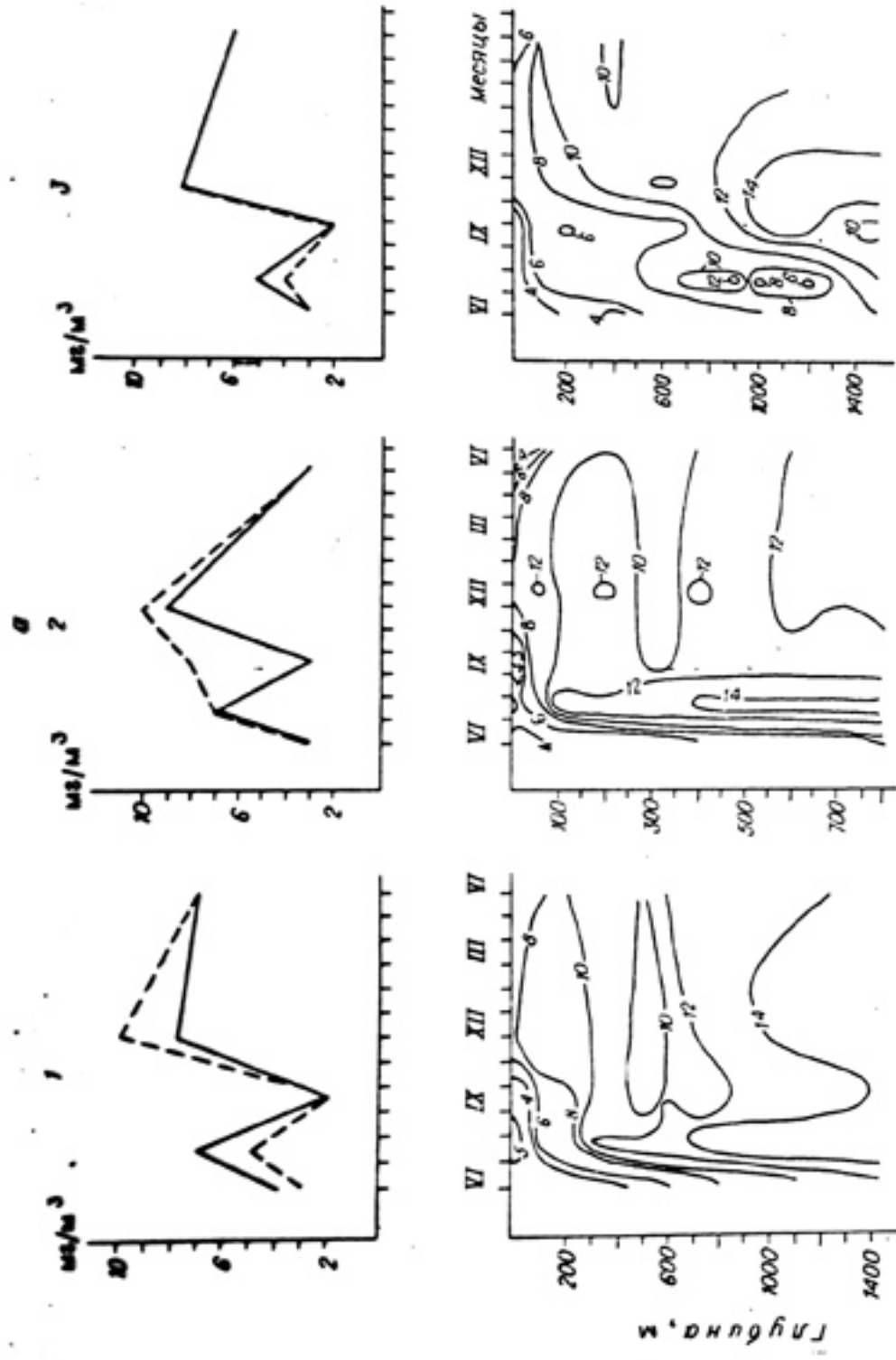


Рис. 30. Сезонные изменения содержания $P-PO_4^{3-}$ (а) и P_{org} (б) в водах станций у мысов Кадиль-ныйя (1), Ухан (2) и Елохин (3).

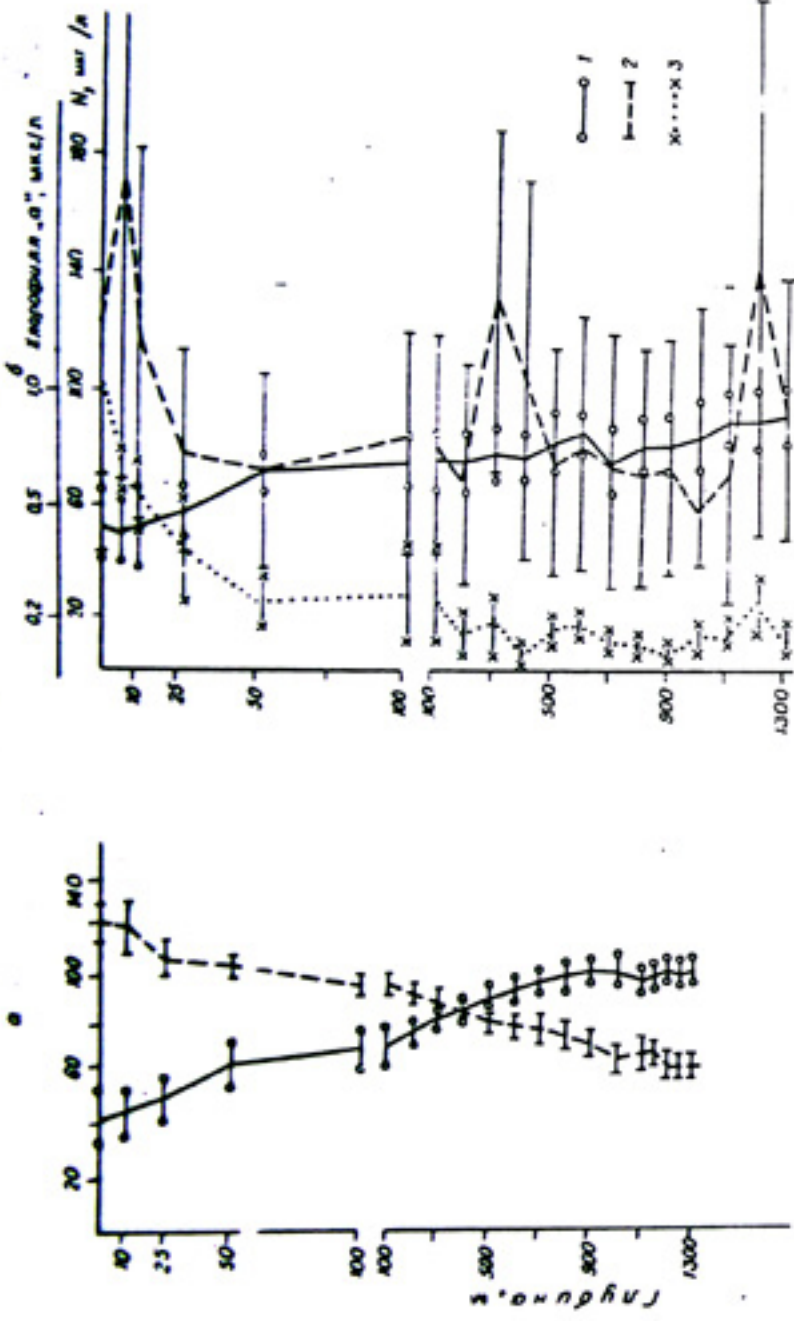


Рис. 31. Содержание $N-NO_3^-$ (1), N_{org} (2) и хлорофилла "а" (3) на разных глубинах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинный) в 1967-1969 гг. (а) и в 1986-1989 гг. (б).

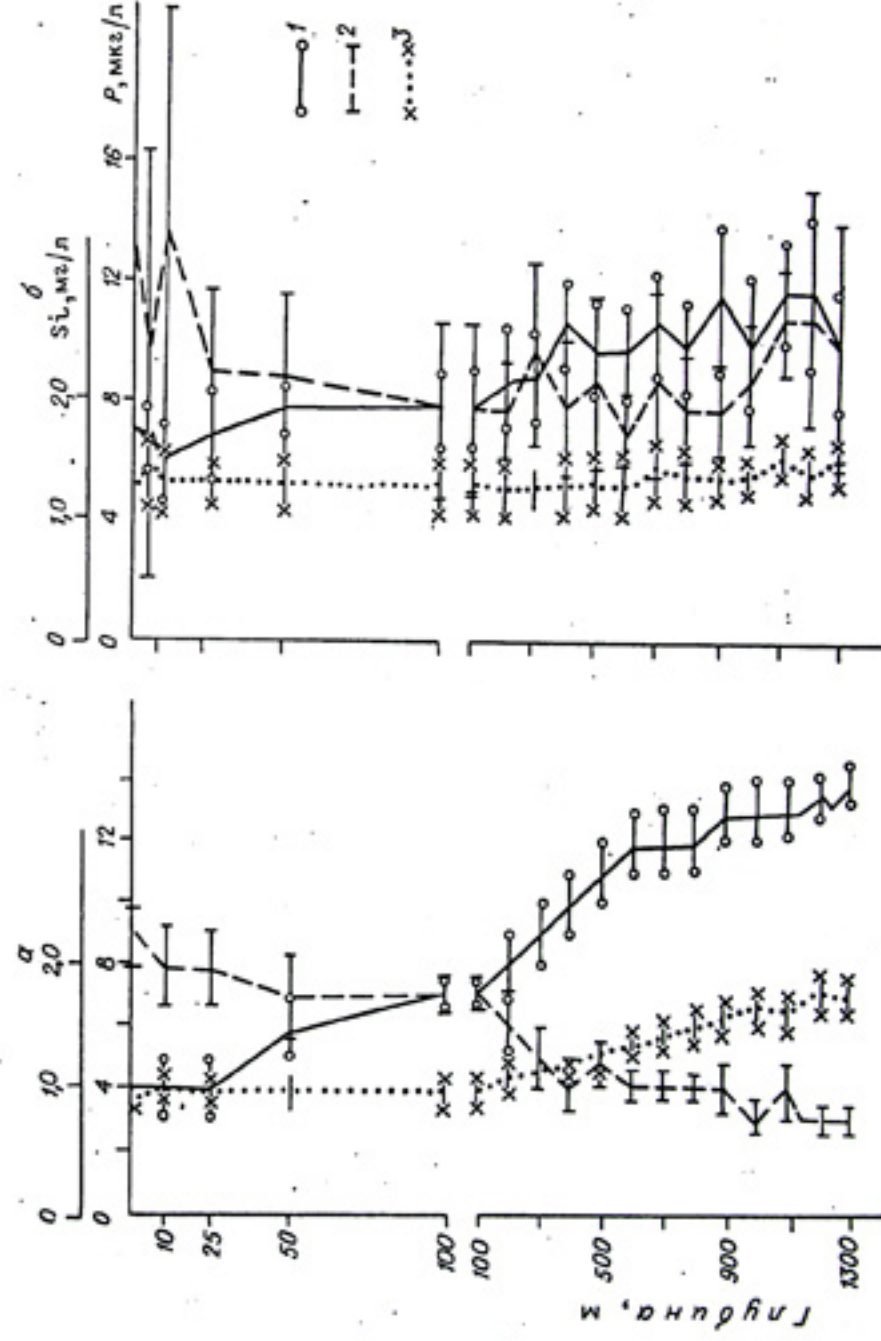


Рис. 32. Содержание $P-PO_4^{3-}$ (1), P_{org} (2) и Si (3) на разных глубинах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинный) в 1967-1969 гг. (а) и в 1986-1989 гг. (б).

Таблица 33. Вертикальное распределение содержания N и P в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Поповинского), мкг/л

Глубина, м	N - NO ₃		P - PO ₄	
	1967-1969 гг.		1967-1969 гг.	
	среднее	min-max	среднее	min-max
0	43	3-86	51	0-136
5	-	-	50	0-136
10	46	11-84	51	9-131
25	52	23-81	57	10-81
50	66	27-102	71	45-99
100	72	20-89	76	32-136
200	79	41-89	76	45-85
300	84	52-89	79	18-104
400	87	63-89	78	63-104
500	94	79-109	83	23-145
600	95	81-109	86	57-113
700	99	86-113	76	52-113
800	100	68-118	81	52-106
900	104	86-122	82	52-113
1000	103	79-122	85	23-145
1100	99	79-109	91	63-117
1150	101	84-113	-	-
1200	104	88-113	91	59-118
1250	103	79-122	-	-
1300	103	86-124	93	48-118

Среднее

в слое 0-1300 м

92 ± 5

84 ± 10

11 ± 1

10 ± 2

Окончание табл. 33

Глубина, м	N _{орг}		P _{орг}	
	1967-1969 гг.		1967-1969 гг.	
	среднее	min-max	среднее	min-max
0	123	92-152	185	63-521
5	-	-	193	13-626
10	122	87-180	146	13-372
25	109	87-160	97	16-256
50	105	76-132	107	22-174
100	98	76-120	125	28-341
200	94	76-130	99	16-236
300	91	65-120	126	15-320
400	86	54-120	122	13-280
500	82	54-108	81	24-280
600	80	54-108	84	22-285
700	79	54-112	106	22-285
800	76	43-112	86	14-256
900	73	54-108	85	14-242
1000	67	54-83	82	11-200
1100	69	54-110	71	14-228
1150	69	54-88	-	-
1200	64	43-97	160	40-463
1250	63	43-80	-	-
1300	64	54-97	109	22-327

Среднее в

в слое 0-1300 м

81 ± 7

103 ± 50

4 ± 1

9 ± 3

Таблица 34. Изменение отношений биогенных элементов по вертикали в открытой части Южного Байкала (12 км от м. Половинного) за 1967-1969 гг. (1) и 1986-1989 гг. (2), ат.

Глубина, м	$\frac{N-NO_3^-}{P-PO_4^{3-}}$		$\frac{Si}{N-NO_3^-}$		$\frac{Si}{P-PO_4^{3-}}$		$\frac{Si}{N_{org}}$		$\frac{Si}{P_{org}}$		$\frac{Si}{N_{общ}}$		$\frac{Si}{P_{общ}}$	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	24	16	11	13	253	200	4	4	114	102	3	3	79	68
5	-	16	-	15	-	226	-	4	-	163	-	3	-	95
10	25	19	10	13	261	247	4	4	131	104	2	3	87	73
25	28	18	9	12	262	217	4	7	131	172	3	5	87	96
50	25	20	7	10	179	185	4	6	148	165	3	4	81	87
100	22	21	7	9	148	192	5	6	148	192	3	4	74	96
200	22	19	7	9	142	169	5	7	195	188	3	4	82	89
300	21	19	6	9	134	169	6	5	244	153	3	3	87	80
400	19	16	6	9	125	133	6	6	308	185	3	3	89	77
500	19	18	6	8	119	153	7	9	269	169	3	4	83	80
600	17	19	7	8	122	153	8	8	365	213	4	4	91	89
700	18	15	7	10	131	150	9	7	392	186	4	4	98	83
800	18	18	7	9	136	159	10	8	408	196	4	4	102	88
900	18	15	7	9	131	131	11	8	423	196	4	4	100	79
1000	18	19	8	9	137	161	12	9	593	179	5	4	111	85
1100	17	17	8	9	131	154	11	12	423	167	5	5	100	80
1200	18	17	8	8	145	139	13	5	629	150	5	5	118	72
1300	16	21	8	9	136	181	13	7	629	181	5	4	112	91

Среднее в слое 0-1300 м 18 19 7 9 133 163 8 7 369 178 4 4 98 85

Среднегодовое содержание N во взвеси вод открытой части озера в слое 0-1300 м в 1983-1984 гг. составляет 5,3 мкг/л, P - 0,75 мкг/л (табл. 35). Во взвешенном органическом веществе вод Байкала содержится 5 % N и 0,7 % P (табл. 36). Следовательно, основная часть N и P в озере представлена их растворенными фракциями. С глубиной концентрация азота и фосфора во взвеси несколько понижается (рис. 34, а, б). Наиболее изменчив трофогенный слой, хотя и на глубинных горизонтах (900 и 1100 м) среднеквадратическое отклонение средней концентрации N превышает таковое для слоя 0-25 м (рис. 35, а, б). Взвешенное органическое вещество по сравнению с ОВ в воде более обогащено P: отношения C:P (242) и N:P (19) во взвеси значительно ниже, чем в воде, где они составляют соответственно 477 и 44 (см. табл. 29, 32).

В последние годы в трофогенном слое отмечается нарушение рассмотренной выше сезонной изменчивости, что проявляется в отсутствии летнего максимума содержания нитратов и фосфатов и со-

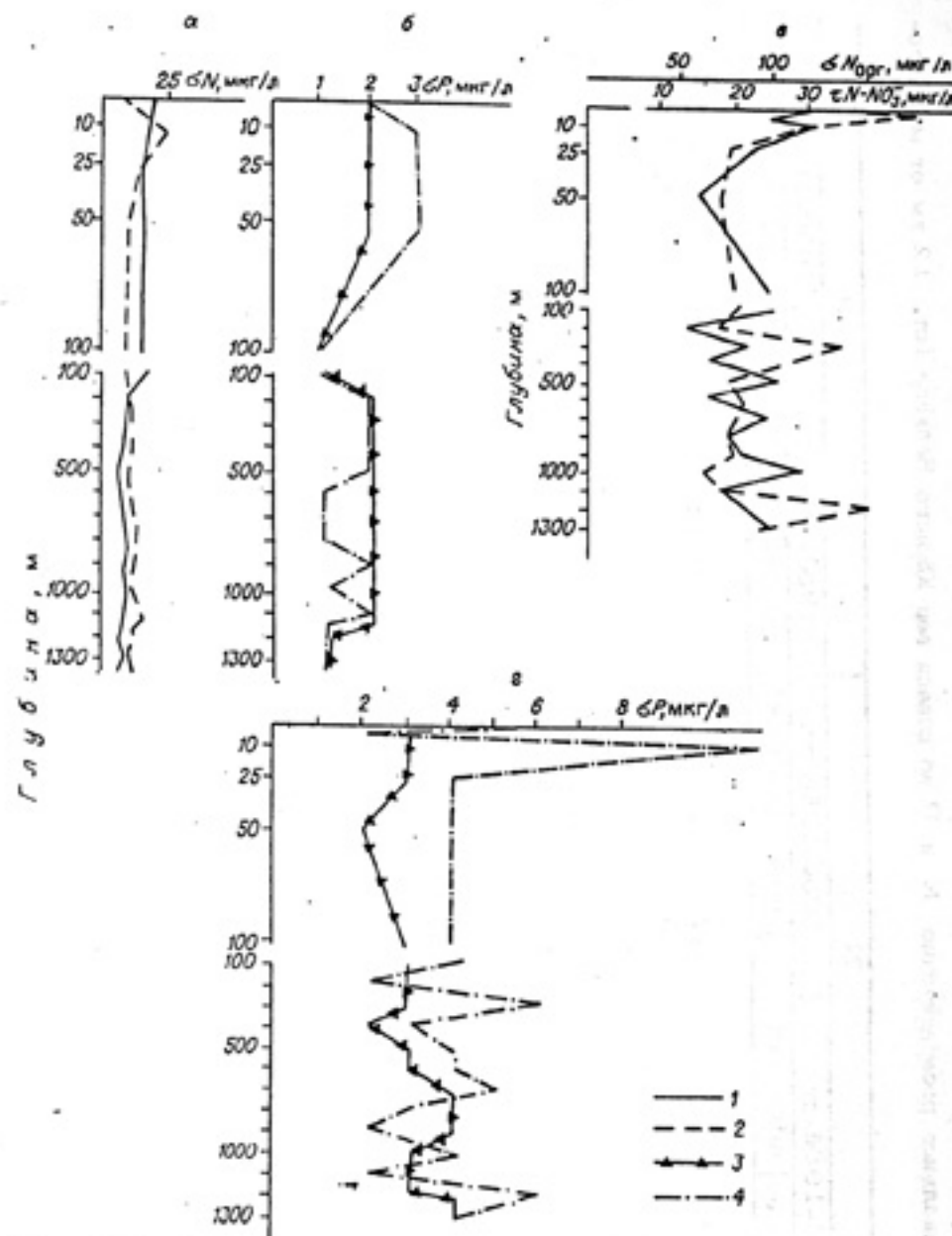


Рис. 33. Среднеквадратическое отклонение содержания азота в 1967-1969 гг. (а), в 1986-1989 гг. (в) и фосфора в 1967-1969 гг. (б), в 1986-1989 гг. (г) на разных глубинах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинный).

1 - $N-NO_3^-$; 2 - N_{org} ; 3 - $P-PO_4^{3-}$; 4 - P_{org} .

Таблица 35. Вертикальное распределение N и P во взвеси вод Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинного), мкг/л

Глубина, м	N				P			
	1983-1984 гг.		1986-1988 гг.		1983-1984 гг.		1986-1988 гг.	
	среднее	min-max	среднее	min-max	среднее	min-max	среднее	min-max
0	12,1	3,6-22	27	5,2-61	1,70	0,23-3,96	3,22	0,54-6,52
5	-	-	36	3,2-77	-	-	4,17	1,17-6,64
10	8,1	3,6-22	26	15,2-37	1,00	0,21-2,62	4,33	1,47-11,7
25	5,8	1,9-19	31	5,2-69	0,96	0,21-2,05	2,38	0,98-3,42
50	5,4	1,9-23	21	8,0-59	0,90	0,48-1,97	2,34	0,49-4,89
100	4,3	1,8-7,5	17	12-32	0,95	0,35-1,90	1,72	0,82-2,74
200	4,7	1,8-7,5	-	-	0,77	0,23-1,50	1,73	0,57-2,74
300	3,5	1,9-7,2	27	5,2-77	0,90	0,35-1,50	1,91	0,82-3,34
400	6,6	3,6-13	26	6,1-40	0,90	0,39-1,22	1,81	0,57-2,74
500	4,7	2,5-8,3	31	12-59	0,90	0,20-1,75	2,23	1,63-3,52
600	3,2	1,3-9,5	-	-	0,60	0,18-0,70	1,82	0,57-4,57
700	3,8	1,9-7,5	29	22-36	0,87	0,42-1,64	1,77	0,57-2,61
800	6,0	1,8-14	17	12-19	-	-	2,02	0,57-3,45
900	9,0	1,0-21	-	-	0,59	0,13-1,05	2,18	0,91-3,14
1000	3,7	1,9-5,0	20	5,2-37	0,85	0,73-1,33	1,61	0,25-4,81
1100	11,6	3,6-20	-	-	0,51	0,37-0,77	1,11	0,69-1,04
1200	-	-	11	5,2-21	-	-	2,72	1,11-5,14
1300	9,1	7,5-14	30	6,4-50	0,47	0,30-0,65	3,26	0,91-7,83
Среднее в слое 0-1300 м	5,3 ± 3,7		25 ± 24		0,75 ± 0,50		1,92 ± 0,95	

Таблица 36. Относительное содержание N и P во взвешенном органическом веществе вод Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинного), %

Глубина, м	N		P	
	1983-1984 гг.	1986-1989 гг.	1983-1984 гг.	1986-1989 гг.
0	7,0	9,9	1,0	1,2
5	-	1,6	-	1,9
10	5,0	9,0	0,60	1,6
25	3,0	14	0,50	1,1
50	3,0	9,0	0,50	1,0
100	3,0	8,0	0,60	0,80
200	6,0	-	0,95	1,4
300	3,3	16	0,85	1,1
400	6,9	25	0,94	1,7
500	8,4	11	1,6	1,1
600	2,7	-	0,5	1,2
700	4,0	19	0,97	1,2
800	8,0	9,0	-	1,0
900	10,5	-	0,69	0,99
1000	3,0	10	0,57	0,82
1100	9,0	-	0,41	0,38
1200	-	9,0	-	2,3
1300	5,0	11	0,26	1,2

Среднее в слое 0-1300 м 5 17 0,7 1,3

ответственно минимума концентрации органических форм N и P (рис. 36, а, б; 37, а, б). Наблюдается также понижение концентраций минеральных форм биогенных элементов в конце сентября-октября, а количество их в зимний период увеличивается до 105 мкг N/л и 12 мкг P/л. Наиболее резкие изменения произошли в характере вертикального распределения биогенных элементов. Если в 1967-1969 гг. с глубиной содержание минеральных форм N и P увеличивалось, а органических уменьшалось, то в 1986-1989 гг. на глубинах свыше 100 м изменение концентраций органических форм азота и фосфора повторяет таковое для их минеральных форм (см. рис. 34, б и 35, б). Средневзвешенные же в слое 0-1300 м (станция в Южном Байкале) концентрации исследуемых компонентов практически не изменились, только для органического фосфора отмечено увеличение его содержания (мкг/л):

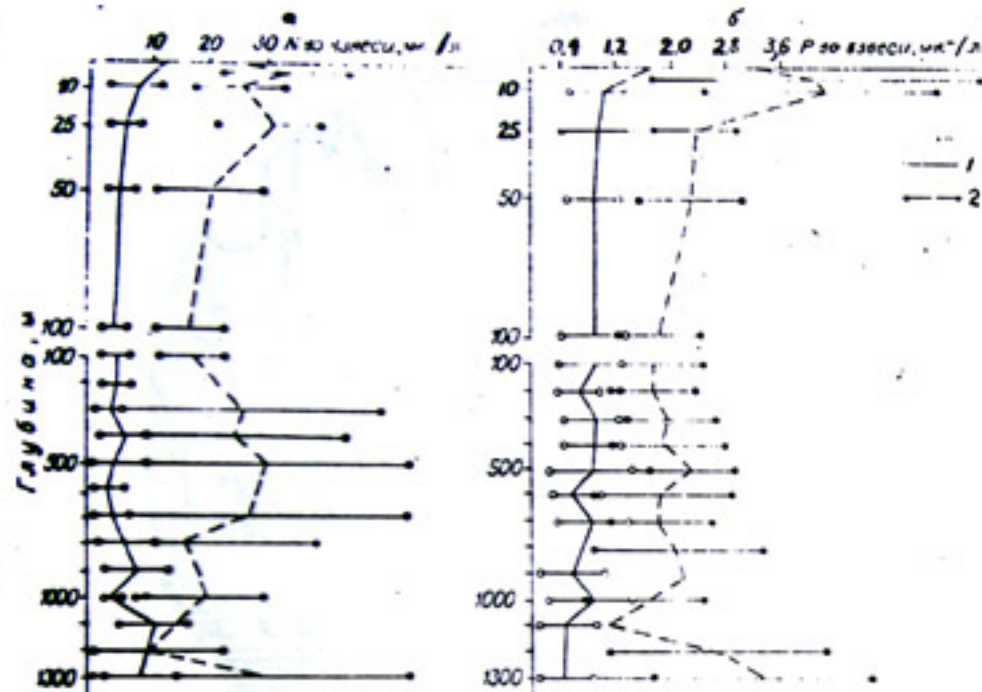


Рис. 34. Содержание взвешенных форм азота (а) и фосфора (б) на разных глубинах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинный). Годы: 1 - 1983, 1984, 2 - 1986-1988.

Годы	$N-NO_3^-$	N_{org}	$P-PO_4^{3-}$	P_{org}
1967-1969	92 ± 5	81 ± 7	11 ± 1	4 ± 1
1982-1984	81 ± 10	63 ± 30	-	-
1986-1989	84 ± 10	103 ± 50	10 ± 2	9 ± 3

Возрастание органических форм биогенных элементов отразилось и на отношениях их величин (см. табл. 29). Отношения $C:P$ уменьшились от 477 в 1983-1984 гг. до 299 в 1986-1989 гг., а $N:P$ от 44 до 25. Наблюдается тенденция уменьшения концентрации хлорофилла "а" в слое 0-1300 м (см. табл. 33).

В последние годы в толще вод южной части Байкала увеличилась доля C_{org} (см. табл. 30) - в 5, 7 раза от общего количества взвешенного материала и в 3 раза от общего C_{org} в воде. Со-

держание N во взвеси в 1986-1988 гг. увеличилось даже по сравнению с 1983-1984 гг. в 5 раз, P - в 2,6 раза (см. табл. 35). По вертикали характерно увеличение взвешенного C , N и P на горизонте 1300 м. Отношения $C:N$ и $C:P$ во взвешенном

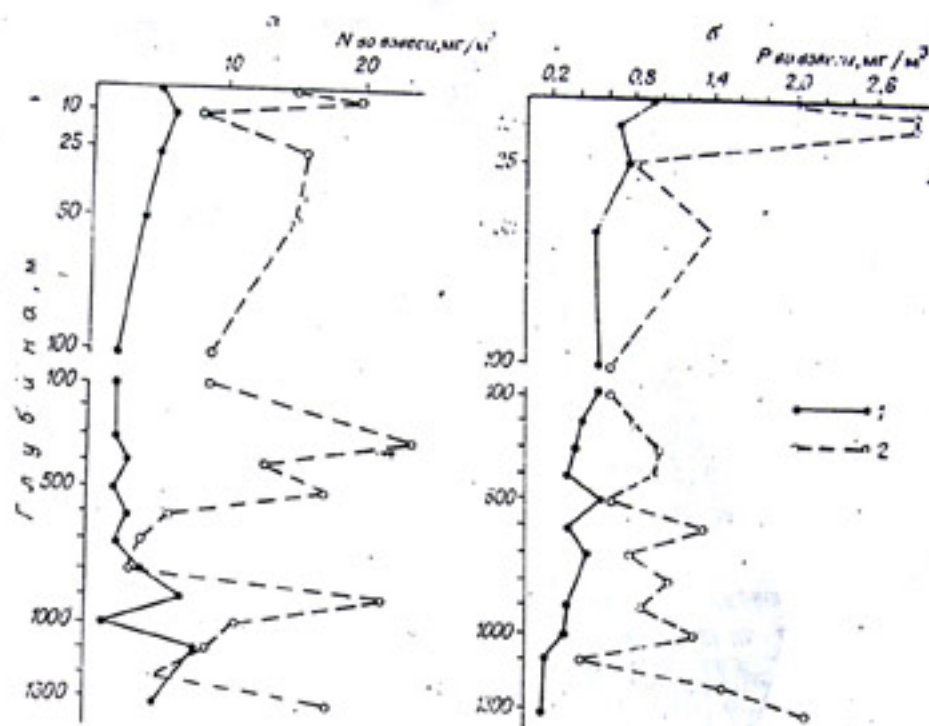


Рис. 35. Среднеквадратическое отклонение содержания взвешенных форм азота (а) и фосфора (б) на разных глубинах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинный). Годы: 1 - 1983, 1984; 2 - 1986-1989; 3 - 1986-1988.

органическом веществе в среднем в слое 0-1300 м в 1986-1988 гг. уменьшились соответственно в 4 и 13 раз по сравнению с 1983-1984 гг., а $N:P$, напротив, увеличились в 1,5 раза. Последние, несомненно, можно объяснить разной скоростью трансформации азот- и фосфорсодержащих ОБ, более быстрой для фосфорорганических, чем азоторганических соединений. В 1986-1988 гг. область вод со значениями $C:N$ во взвеси в слое 0-1300 м меньше 5 занимает большую часть времени, в то время как в 1983-1984 гг. преобладали $C:N$ значительно больше 5 (рис. 38, а, б). Отмечены и изменения отношений $C:P$ и $N:P$ во взвешенном веществе вод: если в 1983-1984 гг. доминировали значения $C:P$ до 200, а $N:P$ - до 30, то в 1986-1988 г. - свыше 200 и 30 соответственно (рис. 39, а, б и 40, а, б).

Содержание кремния в водах Байкала весьма невелико. В поверхностных слоях воды среднегодовая концентрация составляет 0,92 мг/л, с глубиной она возрастает, достигая на максимальных глубинах озера в среднем 1,70 мг/л (см. рис. 32, а). Се-

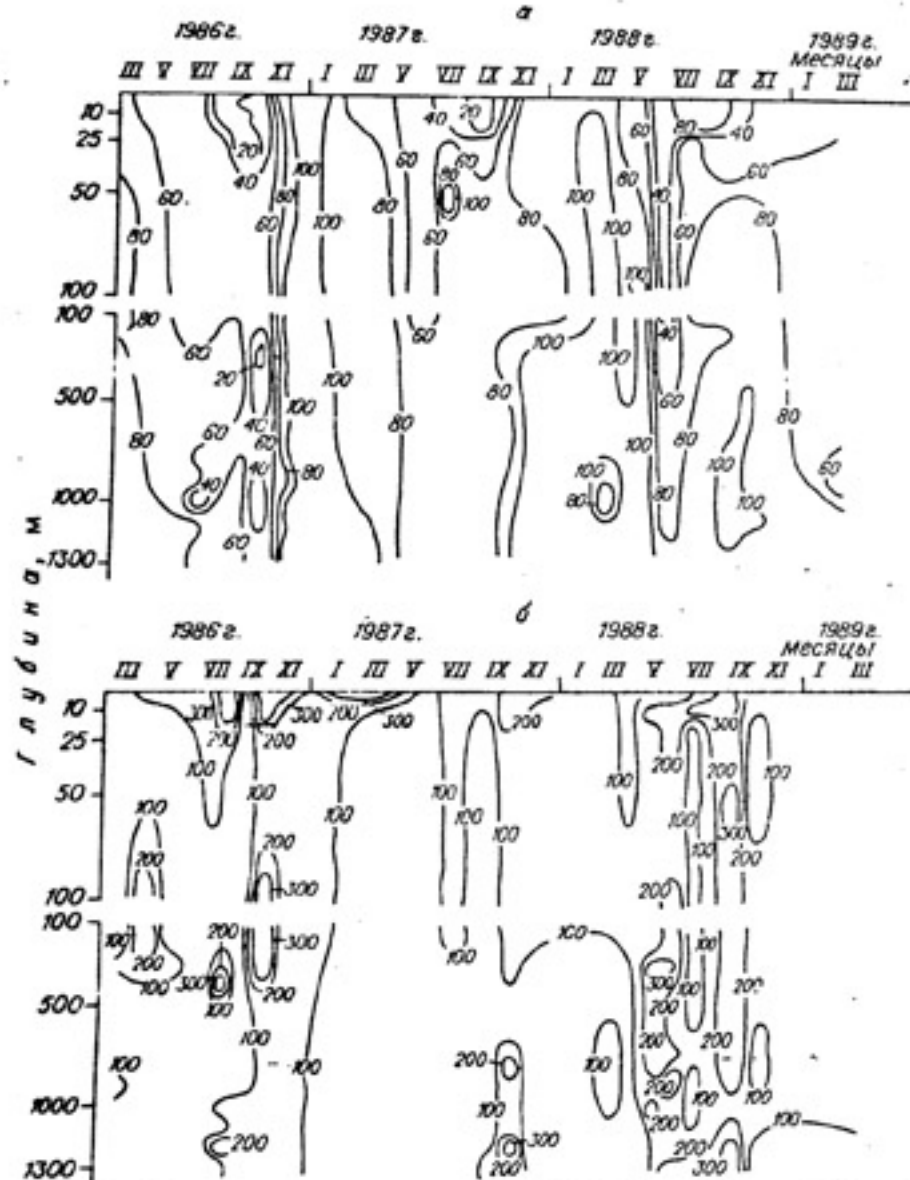


Рис. 36. Сезонное содержание $N-NO_3^-$ (а) и N_{org} (б) в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинный).

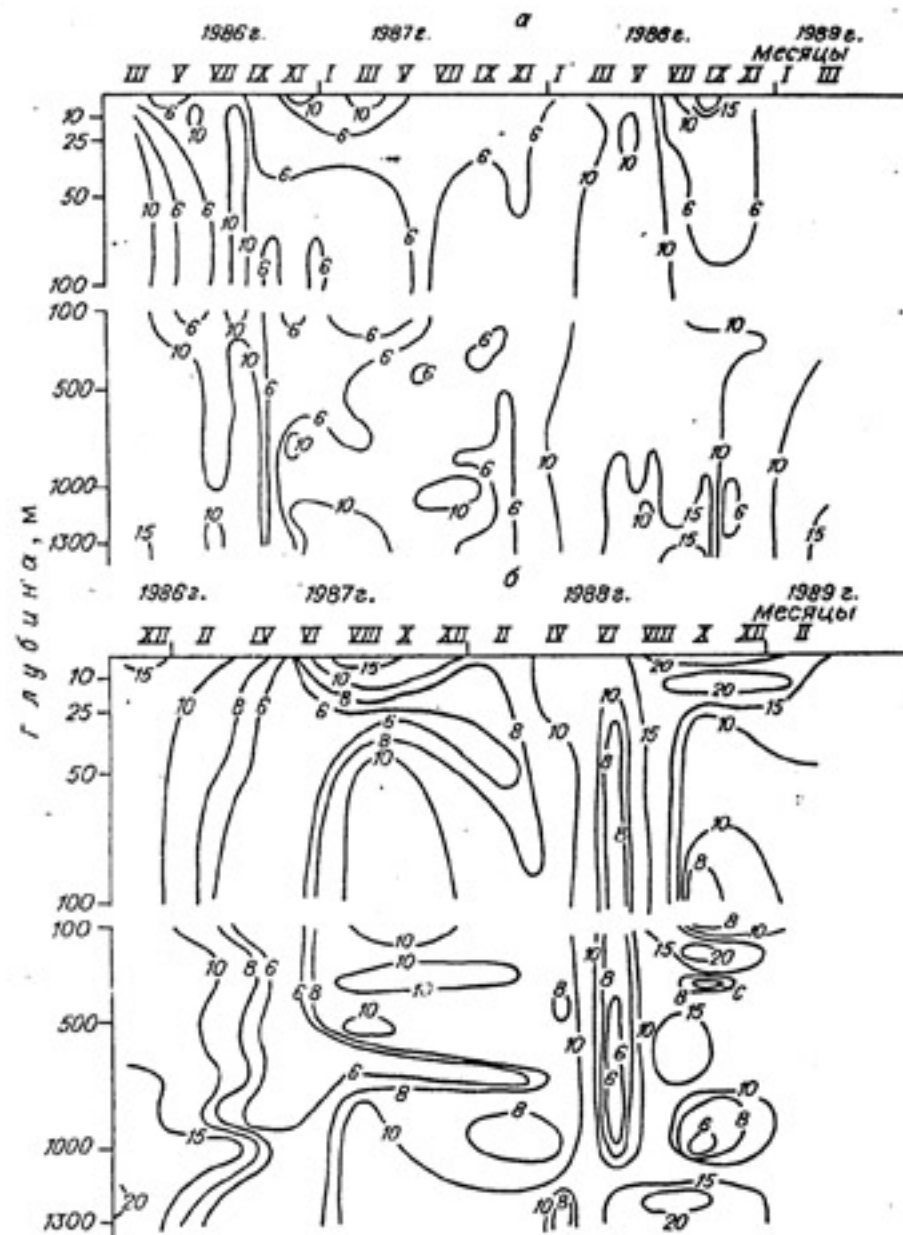


Рис. 37. Сезонное содержание $P-PO_4^{3-}$ (а) и P_{org} (б) в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинный).

где непосредственно влияние процессов его потребления диатомовыми водорослями уже не сказывается, имеет более сложный характер, обусловленный водообменом, процессами деструкции отмерших организмов и другими факторами. Максимальные его концентрации

зональные изменения содержания кремния в верхних слоях (до глубины около 100 м) характеризуются годовым максимумом зимой при ледоставе (февраль), годовым минимумом весной (май). В конце июля – начале августа в верхних слоях воды концентрация кремния несколько возрастает, а в сентябре–октябре в период осенней вегетации фитопланктона в некоторые годы вновь немного снижается. Сезонная изменчивость содержания кремния на больших глубинах,

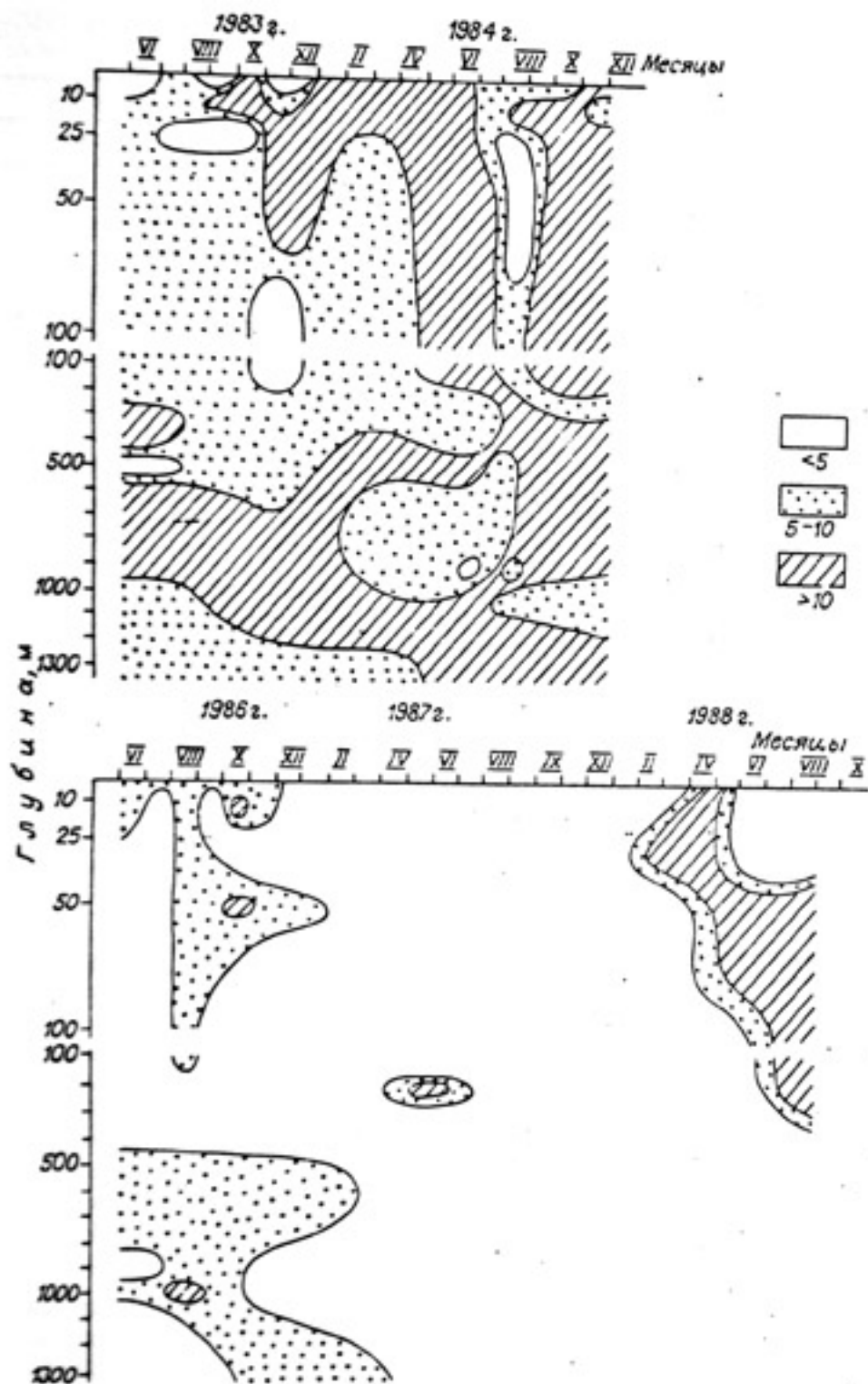


Рис. 38. Сезонные изменения отношения С:N во взвеси вод Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинный).

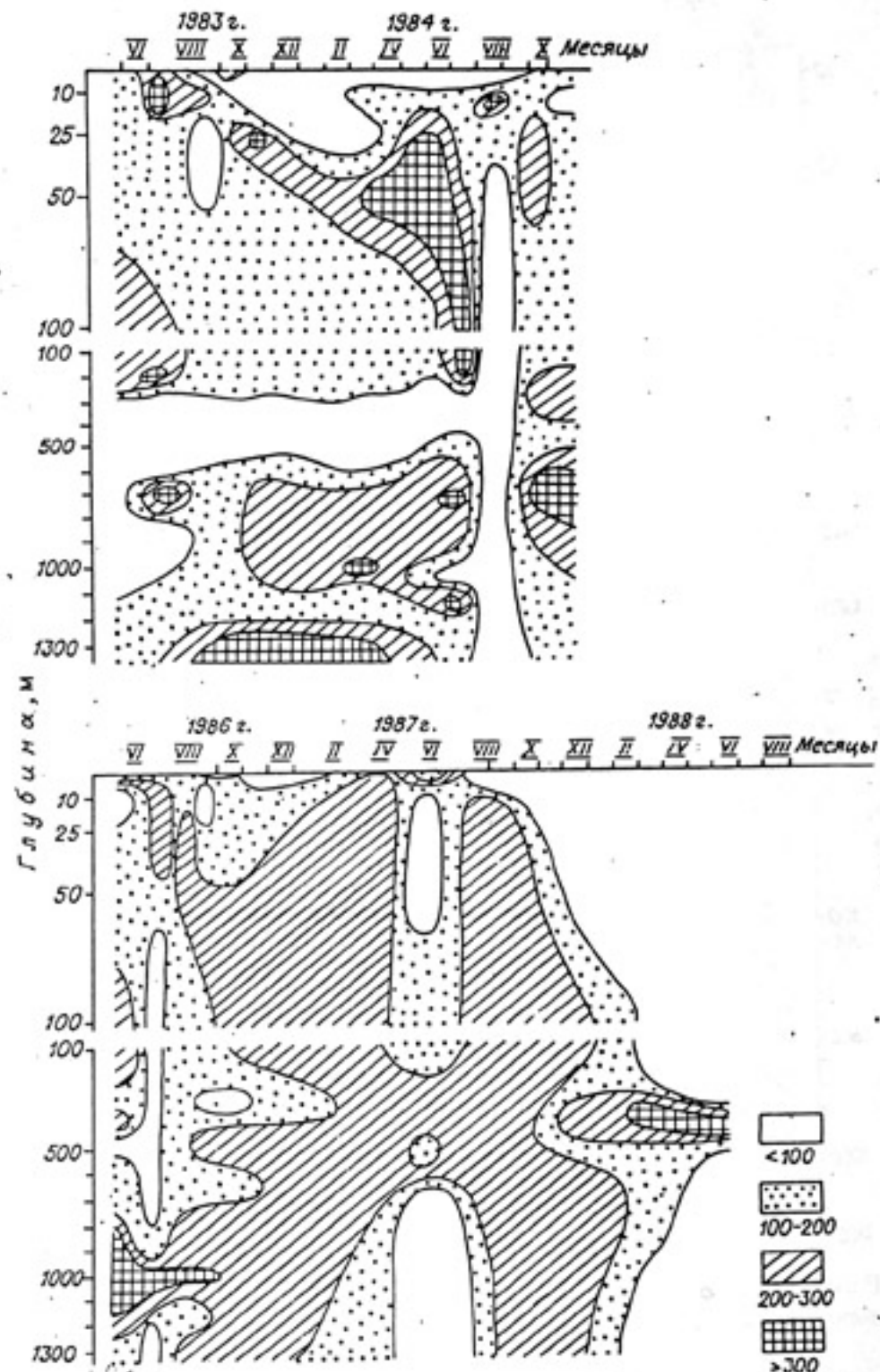


Рис. 39. Сезонные изменения отношения С:P во взвеси вод Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинный).

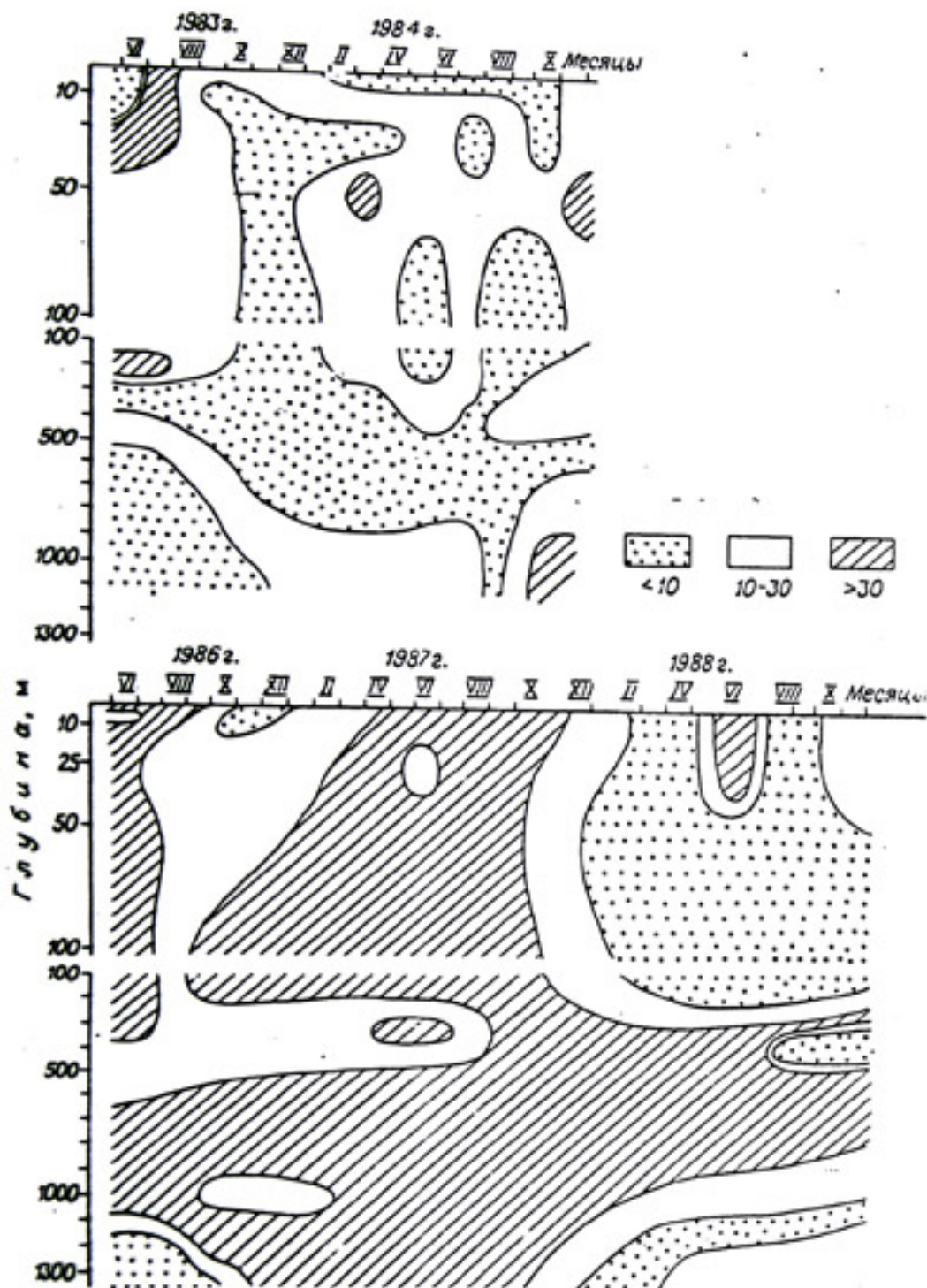


Рис. 40. Сезонные изменения отношения $N:P_{\text{по взвеси}}$ вод Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинный).

Таблица 37. Вертикальное распределение содержания $Si-SiO_2$ в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинного), мг/л

Глубина, м	1967-1969 гг.		1986-1989 гг.	
	среднее	min-max	среднее	min-max
0	0,92	0,56-1,22	1,28	0,93-2,99
5	-	-	1,45	0,93-4,49
10	0,95	0,74-1,50	1,31	0,93-2,24
25	0,94	0,74-1,22	1,34	0,97-2,24
50	0,96	0,74-1,40	1,31	1,01-2,24
100	0,96	0,74-1,22	1,38	1,01-2,62
200	1,03	0,75-1,22	1,31	0,92-1,59
300	1,09	0,84-1,40	1,31	0,92-2,24
400	1,13	0,94-1,40	1,33	0,93-2,06
500	1,20	0,94-1,50	1,34	0,93-2,06
600	1,33	1,03-1,50	1,38	1,03-2,24
700	1,42	1,12-1,63	1,49	1,12-1,87
800	1,48	1,12-1,87	1,41	1,13-1,87
900	1,55	1,22-1,87	1,42	1,12-1,87
1000	1,61	1,31-1,87	1,42	1,03-1,91
1100	1,55	0,94-1,96	1,66	1,12-2,99
1200	1,72	1,40-2,24	1,49	1,22-1,88
1300	1,70	1,50-1,96	1,57	1,22-2,62

Среднее

в слое

0-1300 м ... $1,34 \pm 0,08$

$1,41 \pm 0,14$

на глубинах свыше 100 м приурочены к июню-июлю и октябрю и, как правило, совпадают с максимальным содержанием сульфатов, $ОВ$, азота и фосфора (минеральные формы).

За последние годы в трофогенном слое вод открытого озера произошло увеличение среднегодовых значений содержания кремния при почти неизменной средней его концентрации в слое 0-1300 м (табл. 37; рис. 32, б). Изменение вертикального распределения содержания кремния, азота и фосфора сказалось и на изменениях их отношений (см. табл. 34), наиболее существенно для $Si:P_{\text{орг}}$ они уменьшились от 369 в 1967-1969 гг. до 179 в 1986-1989 гг.

Нарушение произошло в характере сезонных изменений концентрации кремния: максимальное содержание приходится на апрель-июль, минимальное - на зимний период, особенно заметно оно в 1986 и 1987 гг. (рис. 41). В 1988-1989 гг. характер сезонных изменений концентрации кремния, как и для исследуемых компонентов, восстанавливается.

БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ФАКТОРЫ,
СТИМУЛИРУЮЩИЕ РАЗВИТИЕ ФИТОПЛАНКТОНА

По современным представлениям азот и фосфор имеют решающее значение как стимуляторы эвтрофирования водоемов. Обзор экспериментальных и натурных исследований по биогенному лимитированию роста фитопланктона, сделанный Неску и Kilham /1988/, показал, что в пресных водах Р-лимитирование доказано на всех уровнях сложной экосистемы, от культуры водорослей до всего водоема. Доказательство за Р-лимитирование было настолько убедительным, что фосфор был рекомендован как основа для контролирования эвтрофикации в северных американских и европейских внутренних водах. Литература по исследованию биогенного лимитирования развития водорослей в морских и солоноватых экосистемах довольно противоречива. До 1970 г. имелось равное число ссылок в году на N- и Р-лимитирование. Затем произошло четырехкратное увеличение в ссылках на N-лимитирование, в то время как ссылки на Р в году остались почти неизменными [Carpenter, Capone, 1983].

Клетки водорослей для воспроизводства требуют элементы в определенных пропорциях [Redfield, 1934]. Для роста водорослей среднего состава (см. табл. 25) в речных водах (осредненные значения) лимитирующими компонентами могут стать только фосфор, железо и кобальт, в морских — P, N, Si, Fe, Zn, Cu, Mn и Co, т. е. они присутствуют в подобных или меньших количествах, чем это требуется для роста фитопланктона [Nesku, Kilham, 1988] (табл. 38). Если сравнить элементный состав вод Байкала и Селенги с таковым водорослей (см. табл. 32), то видно, что все элементы, кроме фосфора и кобальта, находятся в избытке. При сопоставлении же относительного состава доминирующих форм оз. Байкал (табл. 39) с таковым в водах открытой части озера (ст. 12 км от м. Половинного) видно, что в 1967–1969 гг. лимитирование роста весеннедоминирующих форм водорослей вызывал только фосфор, а в 1986–1989 гг. наряду с фосфором для развития мелозоиры и перидиней наблюдается недостаточное количество азота. Действительно, как было отмечено выше, в водах озера в 1986–1989 гг. содержание фосфора увеличилось, концентрация же азота практически не изменилась, и весной в последние годы в Байкале происходит нарушение цикличности развития доминирующих прежде форм фитопланктона.

Биогенное лимитирование роста фитопланктона может быть смоделировано при использовании Droop или Monod модели. Первая предусматривает рассмотрение роста фитопланктона от внутренней концентрации биогенных элементов. Вторая рассматривает зависимость развития фитопланктона от внешней концентрации рас-

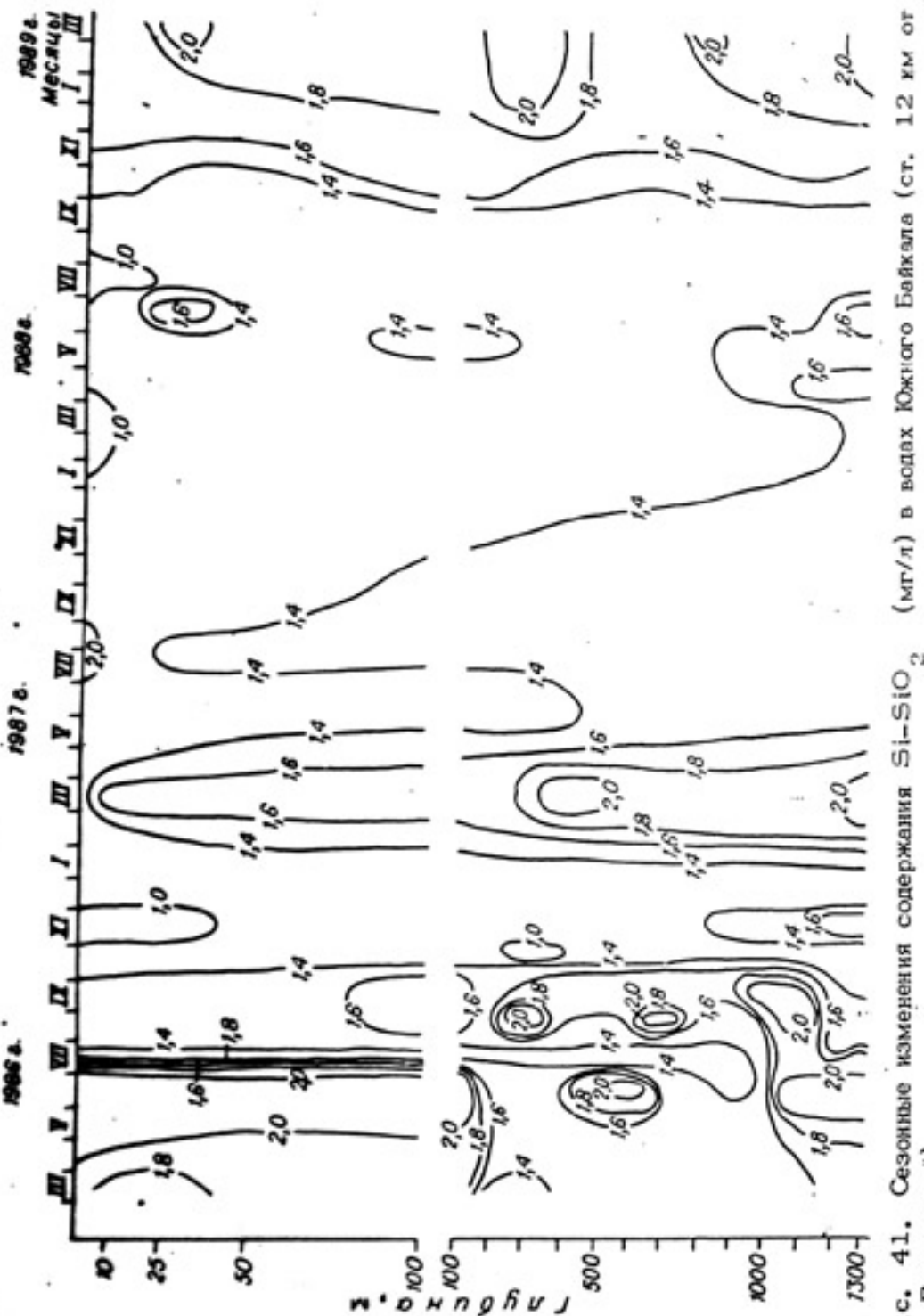


Рис. 41. Сезонные изменения содержания Si-SiO_2 (мг/л) в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинного).

Таблица 38. Относительный химический состав водорослей, растворенных компонентов в реках, океане, Селенге и открытом Байкале (слой 0-1300 м), нормализованный по фосфору (по: Healey, Kilham /1988/)

Элемент	Реки	Водоросли	Океан	Селенга	Открытый Байкал
C	738	102	1,000	421*	268*
N	21	11,1	13	15*	19*
Si	146	96	43	173*	174*
K	26	1,3	4,434	-	-
P	1,0	1,0	1,0	1,0*	1,0*
Na	169	0,74	200,000	1053**	530**
Mg	123	0,66	23,00	779**	398**
Ca	23	0,63	4,480	238**	1224**
S	146	0,54	12,000	411**	166**
Fe	0,55	0,32	(0,0004)	5,9**	0,89**
Zn	0,35	0,012	0,003	1,46**	0,248**
B	0,13	0,008	182	-	-
Cu	0,12	0,004	0,002	0,23**	0,06**
Mn	0,12	0,003	0,002	5,75**	1,82**
Co	0,003	0,003	0,00001	0,026**	0,0011**
Mo	0,004	0,00002	0,048	0,1758**	0,6586**

* Наши данные, средние за 1986-1989 гг.

** Данные В. А. Ветрова, А. И. Кузнецовой /1983/.

Таблица 39. Относительное содержание С, N и P в мелозире, синедре, перидиниях и водах открытой части озера (нормализовано по P)

Элемент	Мелозире	Синедра	Перидинии	Воды Байкала 1967-1969 гг.	(0-25 м) 1986-1989 гг.
C	224	74	213	719	471
N	21	7,5	20	26	18
P	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

творенных биогенных элементов. Kilham и Hesky /1988/ отмечают, что обе модели имеют как положительные, так и отрицательные стороны. Применение модели Монода ограничивается аналитическими методами, когда невозможно измерить очень низкие концентрации биогенных элементов, а также большим объемом исследований по учету всех элементов баланса биогенных веществ. Использование же модели Droop возможно при определении элементного состава взвешенного вещества и в настоящее время находит широкое применение. Обе модели основаны на отношениях биогенных элементов, оптимальных для развития фитопланктона /Redfield, 1934/. Показателем развития водорослей является измерение концентрации хлорофилла "а".

Для решения вопроса о биогенном лимитировании развития фитопланктона нами использованы материалы натурных исследований 1967-1989 гг., выполненные в притоках бассейна озера, атмосферных осадках и в самом озере, причем биогенные элементы, как отмечено выше, определены в нефилтрованной воде и во взвеси. Вопрос о физической лимитизации роста водорослей не рассматривается. На основании многолетних исследований Ладожского озера установлено, что в глубоких холодноводных озерах при антропогенном эвтрофировании из всех факторов, определяющих интенсивность "первичного продуцирования органического вещества в водоеме, меняется только один - обеспеченность биогенными веществами, термический же режим и глубина озера остаются прежними" /Современное состояние..., 1987, с. 10/.

Отношение N:P (минеральные формы) в нефилтрованных водах притоков озера в среднем за год колеблется в широких пределах (от 6 в р. Сухой до 36 в р. Мурино, в среднем для основных притоков озера оно равно 22). Близкое к 30 отношение N:P имеют воды Баргузина, Снежной, Томпы, Рели, Утулики и Мурино. Согласно литературной сводке /Uhlmann Ditrich, 1982/ отношений N:P (неорганических форм), определяющих биогенное лимитирование, притоки озера несут воды, которые могут вызывать как P-, так и N-лимитирование развития фитопланктона:

P-лимитирование при N:P, равном или более чем	N-лимитирование при N:P, равном или менее чем
26	11
22	11
22	22
31	
17	17
50	4...13
Геометрическая средняя	
26	11

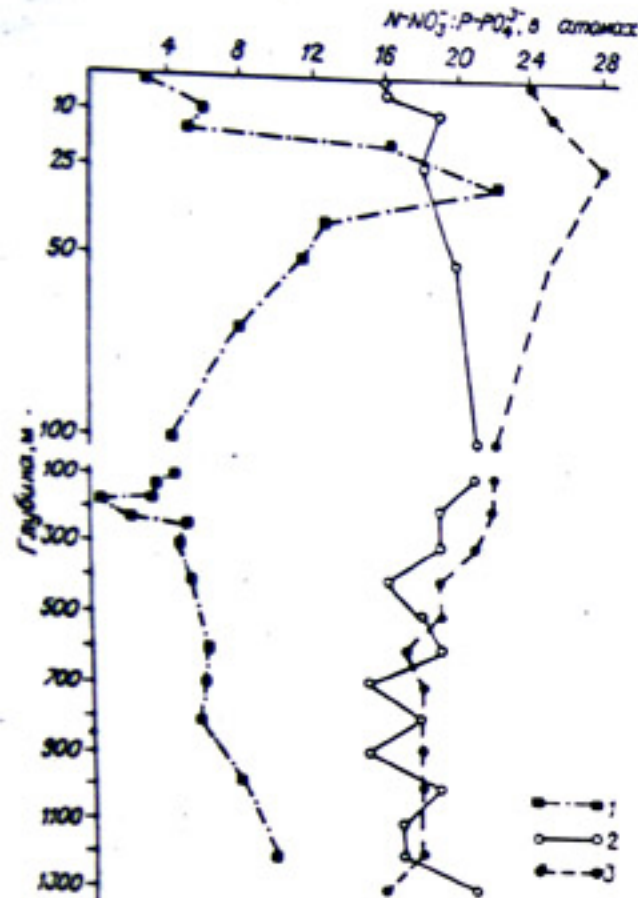


Рис. 42. Отношение минеральных форм N:P на разных глубинах озер Танганьика и Байкал.

1 - оз. Танганьика, IV 1975 г.; 2 - Байкал, 1967-1969 гг.; 3 - Байкал, 1986-1989 гг.

Среднее отношение минеральных форм N:P в слое 0-1300 м вод открытой части озера изменяется от 18 в 1967-1969 гг. до 19 в 1986-1989 гг. (см. табл. 29). До глубины 100 м отношения N:P возрастают, далее - несколько уменьшаются (в 1967-1969 гг.). В 1986-1989 гг. в слое 0-

100 м они были несколько выше. Закономерность же вертикального распределения отношений N:P сохраняется. В водах оз. Байкал их значения гораздо выше, чем в оз. Танганьика (рис. 42). Следует отметить, что отношения N:P в толще вод Байкала сильно подвержены сезонным изменениям /Тарасова, 1975/. Максимальны они весной и осенью, минимальны - в зимний период и в июле. В мае 1968 г. во время максимального развития мелозирь они достигают 54, во время массового развития синедры в мае 1969 г. - 42, в период развития перидиней в апреле 1965 г. - 36. Столь высокие их значения, наблюдаемые во время развития мелозирь и синедры, дали основание предполагать /Тарасова, 1975/, что развитие мелозирь байкальской и синедры лимитируется фосфором.

В последние годы отмечается нарушение в цикличности развития фитопланктона /Поповская, 1986/. Мелозира байкальская, ранее доминировавшая через 2-3 года, в настоящее время развивается через 7-8 лет, в весеннем фитопланктоне все большую роль играет ранее не развивавшаяся в озере в массе нитшья ацикулярис. Сезонные изменения отношений N:P за 1986-1989 гг. подтверждают произошедшие большие изменения в озере, особенно в 1986 г. (рис. 43). Низкие значения этих величин отмечаются и в глубоководной области. В зимний период 1987 г. они повышаются до 30 и весной в массе развивается нитшья аци-

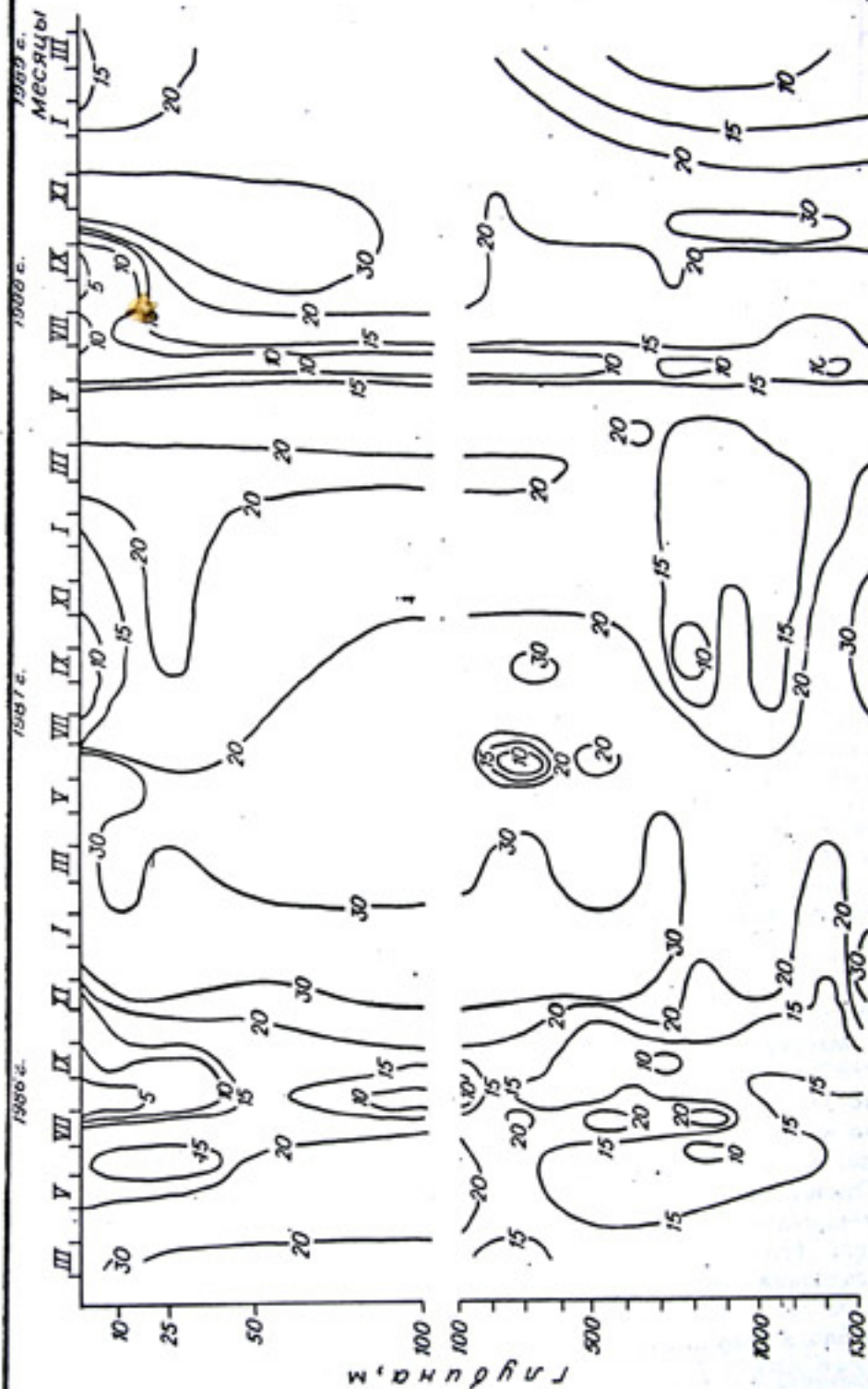


Рис. 43. Сезонные изменения отношения минеральных форм N:P в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Поповинный).

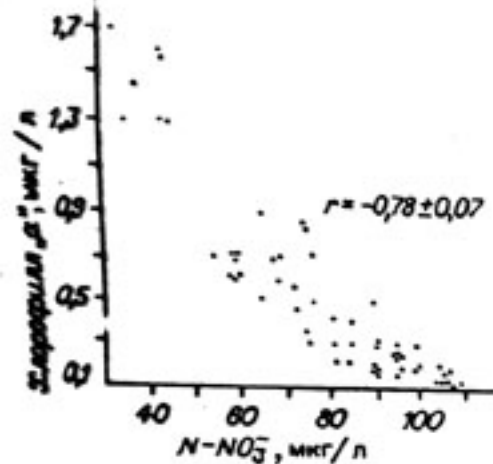


Рис. 44. Зависимость весенней концентрации хлорофилла "а" от зимнего содержания $N-NO_3$ в водах Байкала.

кулярис. Вновь низкие их значения наблюдаются в летний период 1988 г. Восстановление прежних закономерностей сезонных изменений значений $N:P$ до марта 1989 г. не произошло.

Понижение отношений $N:P$, особенно заметное в трофогенном слое, дает основание предполагать, что в настоящее время возрастает роль азота. На самом деле нами обнаружена при 95%-й вероятности достоверная обратная зависимость весенней концентрации хлорофилла "а" от зимнего содержания нитратного азота за 1978–1988 гг., исключая 1981 и 1985 гг. (около 70 % всех отобранных проб приходилось на Южный Байкал) (рис. 44). Обратная корреляция содержания хлорофилла "а" с азотом, а также обратная зависимость между количеством взвеси и хлорофилла "а" зимой в водах Селенги позволяют предположить, что в водах Селенги и открытого Байкала содержатся органические токсиканты, в составе которых находится азот.

Отношение органических форм $N:P$ в нефiltroванных водах Южного Байкала в слое 0–1300 м очень сильно изменилось даже по средним их значениям. Они уменьшились от 44 до 25, что произошло за счет увеличения содержания P_{org} , особенно заметное в слое 100–1300-м. Тенденция уменьшения указанных величин наблюдается и в водах Селенги – от 39 в 1970 г. до 14 в 1987 г. (напомним, что в зимний период в водах Селенги обнаружено значительное количество P_{org} – до 400 мкг/л).

Отношение $C:N$ в нефiltroванных водах по средним значениям в слое 0–1300 м в 1986–1989 гг. по сравнению с 1967–1969 гг. не изменилось. В течение года и по годам оно подвержено значительным колебаниям: если в 1986 г. и первую половину 1987 г. преобладали значения $C:N$ более 10, то в 1988 г. – от 5 до 10 (рис. 45). В притоках бассейна оз. Байкал они значительно выше, чем в озере, и колебались от 11 (в Верх. Ангаре и Рели) до 44 (в р. Половинной) (см. табл. 16).

Отношение $C:P$ в нефiltroванных водах открытого Байкала уменьшилось от 477 в 1967–1969 гг. до 299 в 1986–1989 гг. (см. табл. 29). Изменение характера вертикального распределения отношений $C:P$, особенно заметное в глубинной области озера, в 1986–1989 гг. по сравнению с 1967–1969 гг. произошло в результате увеличения содержания P_{org} . Возраста-

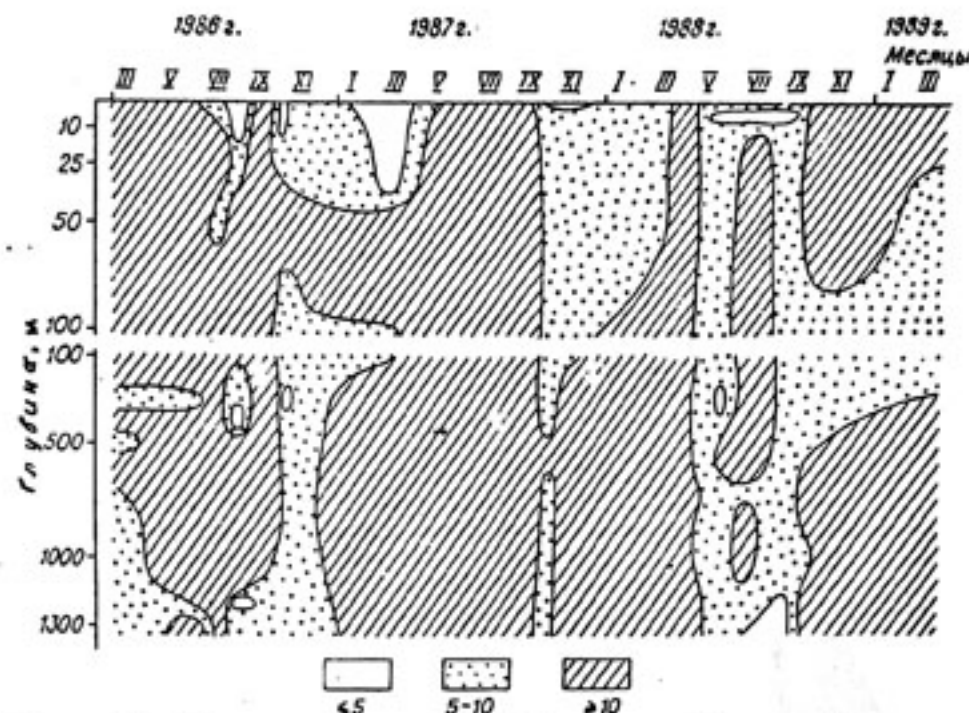


Рис. 45. Сезонные изменения $C:N$ в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинной).

ние отношений $C:P$ с глубиной в 1967–1969 гг. – это результат трансформации органического вещества [Тарасова, 1975/.

Химический состав взвешенного вещества в водоемах и соотношение биогенов по взвеси ($C:N$, $C:P$ и $N:P$) более достоверно отражают биогенное лимитирование в развитии фитопланктона. Установлено, что при $N:P > 23$ и $C:P > 133$ наблюдается P – лимитирование, при $C:N < 7$ N – лимитации нет, при $C:N$, равном 7–15, отмечается средний уровень N – лимитации, при $C:N > 15$ – N – лимитирование строгое [Healey, Hondzel, 1980/.

Указанные выше значения отношения биогенов установлены нами в притоках озера, атмосферных осадках и водах оз. Байкал с 1983 г. Как было показано выше, в водах даже открытой части озера в это время увеличилось содержание взвешенного органического вещества в общем количестве взвеси по сравнению с 1968–1969 гг. в 5, 7 раза, а в общем содержании органического вещества в 3 раза. Напомним, что в 1968 г. был высок урожай мезоциры байкальской, а в 1969 г. – синедры; 1983 и 1984 гг. были бедными в развитии фитопланктона. Изменения произошли и в водах притоков озера. Таким образом, рассмотрение вопроса о биогенном лимитировании роста фитопланктона в озере по элементному составу взвешенного органического вещества будет относиться к годам средней нагрузки на оз. Байкал (1983–1984 гг.) и к годам высокой нагрузки (1986–1988 гг.).

Взвешенное органическое вещество притоков озера более обдeнeно фосфором, чем их воды (см. табл. 16, 19). Высокие значения отношений $C:P$ (от 655 до 1970) и $N:P$ (от 45 до 199) во взвеси рек бассейна озера указывают на то, что они могут вызывать дефицит фосфора в развитии водорослей. С другой стороны, подавляющее число притоков имеют во взвеси вод и довольно высокие значения $C:N$ (до 21), т. е. по Healey и Hendzel /1980/, возможно и N-лимитирование. Аналогичное воздействие могут оказывать и эоловые взвеси атмосферных осадков над Байкалом, так как в них найдены значения отношений $C:N$ до 10, $C:P$ до 570 и $N:P$ до 50. В районах промышленных объектов $C:N$ в эоловой взвеси снижается до 3, $C:P$ - до 17, а $N:P$ - до 2, что способствует N-лимитированию.

В 1983-1984 гг. в трофогенном слое вод открытой части озера отношение $N:P$ во взвеси, как правило, меньше 10, области вод указанных значений отношений встречаются и на горизонтах ниже 100 м. Отношения $N:P > 30$ в водной взвеси за этот период крайне редки (см. рис. 40, а). Таким образом, в 1983-1984 гг. развитие водорослей ограничивается азотом. Напротив, в 1986-1987 гг. преобладающую часть водной толщи (0-1300 м) занимают воды со значениями $N:P > 30$ (см. рис. 40, б). Увеличение содержания азота в водной взвеси по сравнению с фосфором привело к тому, что в этот период наблюдаем P-лимитирование. Возрастающие средние значения $N:P$ во взвеси вод 0-1300 м от 19 в 1983-1984 гг. до 29 в 1986-1988 гг. подтверждает это предположение (см. табл. 32).

Отношение $C:P$ во взвешенном органическом веществе вод открытой части озера изменяется во времени (см. рис. 39, а, б). В 1983-1984 гг. оно колеблется в широких пределах, в основном указанное отношение не превышает 200. Области вод со значениями $C:P$ во взвеси более 300 встречаются, как правило, в периоды весенней и осенней гомотермии. Согласно значениям отношений $C:P$ в доминирующих байкальских формах водорослей их развитие в 1983-1984 гг. тормозилось в большей степени дефицитом азота, нежели фосфора. В 1986-1987 гг. преобладают области вод с отношениями $C:P$ от 200 до 300. В периоды гомотермии они, напротив, понижались до < 200 . Высокие $C:P$ в водной взвеси в исследованный период указывают на недостаток фосфора для развития водорослей.

К такому же выводу приходим согласно анализу сезонных изменений отношений $C:N$ водной взвеси глубоководной станции Южного Байкала (см. рис. 38, а, б). Если в 1983-1984 гг. отмечалось среднее лимитирование по азоту ($C:N$ в трофогенном слое > 10), то в 1986-1987 гг. наблюдалось отсутствие N-лимитации ($C:N < 5$) и только в 1988 г. найдены области вод с возможным лимитированием по азоту.

Достаточно быстрый переход глубоководной части озера за очень короткий срок (от 1983-1984 до 1986-1988 гг.) от N-до P-лимитирования роста фитопланктона свидетельствует о боль-

шом влиянии поступления веществ с бассейна озера даже открытой ее зоны. Для исследованного района Южного Байкала это поступление веществ с притоками Утулика, Снежной, Мурино, Половинной и самое существенное - со стоками и выбросами в атмосферу БЦБК (см. табл. 13). Изменению глубинной области открытой части озера способствует опускание водных масс верхней зоны в нижнюю вдоль подводных склонов. Впервые это явление в Байкале, как было отмечено выше, заметил В. А. Толмачев /1957/.

В водоемах, где преобладают диатомовые водоросли, успешная конкуренция за N и P среди водорослей возможна лишь при достаточном содержании кремния для их развития /Sommer, 1983/. Например, Tilman /1977/ экспериментально показал, что *Asterionella formosa* доминировала при отношении $Si:P > 100$, в то время как *Cyclotella meneghiniana* - при $Si:P < 10$. При промежуточных отношениях виды сосуществовали вместе, так как каждый был лимитирован кремнием (*A. formosa*) или фосфором (*C. meneghiniana*).

Развитие диатомовых водорослей в водоемах более желательно, так как они не образуют вредных поверхностных цветений и не токсичны. Уменьшение содержания кремния в прибрежных морских водах за счет поступления в них хозяйственных сточных вод, которые более бедны этим элементом, может привести к элиминации диатомовых водорослей из фитопланктонного сообщества /Ryther, Officer, 1981/.

В Байкале диатомовым водорослям в фитопланктонном сообществе принадлежит ведущая роль /Поповская, 1975/. Потому так важно исследование отношений кремния к азоту и фосфору. К сожалению, в байкальских видах фитопланктона не установлены значения отношений кремния к азоту и фосфору, поэтому мы остановимся на тех изменениях, которые произошли в значениях этих отношений во взвесах и водах озера за исследованный период, сравнение же полученных отношений будем проводить на основе химического состава водорослей по усредненным значениям согласно литературной сводке (см. табл. 25), по этим данным в водорослях отношение $Si:N$ близко к 1 (0,85), $Si:P$ - 96.

В водах притоков бассейна озера средние значения отношений кремния к минеральному (нитратному) азоту в 1983-1984 гг. достаточно высоки (от 21 до 95) и только в водах рек Снежной и Утулика они составляли 13 (см. табл. 16). Отношение кремния к органическому азоту в водах основных притоков озера также > 1 (от 5 до 13). Таким образом, в этих водах кремний не может выступать в качестве лимитирующего компонента в конкуренции за азот между отдельными видами водорослей. Кремний в исследованных реках также не ограничивает борьбу за фосфор в фитопланктонном сообществе, так как отношение $Si:P_{мин}$ и $Si:P_{орг}$ значительно выше 100 (см. табл. 16).

В сточных водах СЦКК и БЦБК отношения $Si:P_{общ}$ равны соответственно 13 и 10, $Si:N_{общ}$ - 1 и 0,6. Принимая по

Снижение оптимальные для развития диатомовых водорослей отношения кремния к азоту и фосфору (100 и 1), видно, что поступление сточных вод этих комбинатов в воды озера может вызвать перестройку в фитопланктонном сообществе Байкала.

В открытой части Южного Байкала среднезвешенные в слое 0-1300 м значения отношений кремния к азоту и фосфору уменьшились. Если $Si:P_{общ}$ в 1967-1969 гг. было близко к оптимальному отношению для диатомей (98), то в 1986-1988 гг. оно снизилось до 85, а в трофогенном слое - до 68 (см. табл. 38). Отношения $Si:N_{общ}$ сохранились на одном уровне (4).

Особенно заметное уменьшение произошло для $Si:P_{орг}$ (от 369 до 178). Причиной таких изменений, как было показано выше, явилось возрастание в последние годы в открытой части озера содержания растворенного органического фосфора и взвешенного $N_{орг}$. Для отношений $Si:N_{мин}$ и $Si:P_{мин}$, наоборот, характерно повышение их от 7 до 9 и от 133 до 163 соответственно.

С глубиной в 1967-1969 гг. происходит увеличение $Si:P_{общ}$ от 79 до 118, в 1986-1989 гг. возрастание их значений наблюдалось только до 100 м, глубже они оставались примерно в пределах 72-89.

Сезонные изменения этого отношения в 1967-1969 гг. и в 1987-1988 гг. представлены на рис. 46. Напомним, что 1968 г. - год массового весеннего развития мелозиры байкальской, весной 1969 г. в массе развивалась синедра, в 1987 г. - нитишис апикулярис. Зимой 1967 г. - в период, предшествующий развитию мелозиры, отношение $Si:P_{общ}$ в водной толще 0-1300 м было близко к оптимальным значениям для развития диатомовых водорослей. Вегетация мелозиры способствовала извлечению кремния из воды и $Si:P_{общ}$ снизилось в слое 0-12 м до 44-53. В июне это отношение несколько увеличилось, по-видимому, в результате весенней гомотермии. В период открытой воды в озере воды в слое от 0-200 до 0-600 м сохраняли $Si:P_{общ}$ 70-90. Но к декабрю 1968 г. в слое 0-40 м оно изменялось от 77 до 87, т. е. несколько стало ниже, чем в предшествующий развитию мелозиры период. Можно только предполагать, что это отношение оптимально для развития синедры. Так как биомасса синедры ($0,1 \text{ г/м}^2$) в Байкале значительно меньше, чем мелозиры ($4,6 \text{ г/м}^2$), то и слой, где $Si:P_{общ}$ равно 70-90, составлял всего 10-40 м. В глубинных водах в течение всего исследуемого периода преобладали отношения $Si:P_{общ}$ 90-120. Воды со значениями выше 120 крайне редки, в 1987 г. они преобладали. Зимой 1987 и 1988 гг. они были близки к значениям отношения $Si:P_{общ}$ в предшествующий раз-

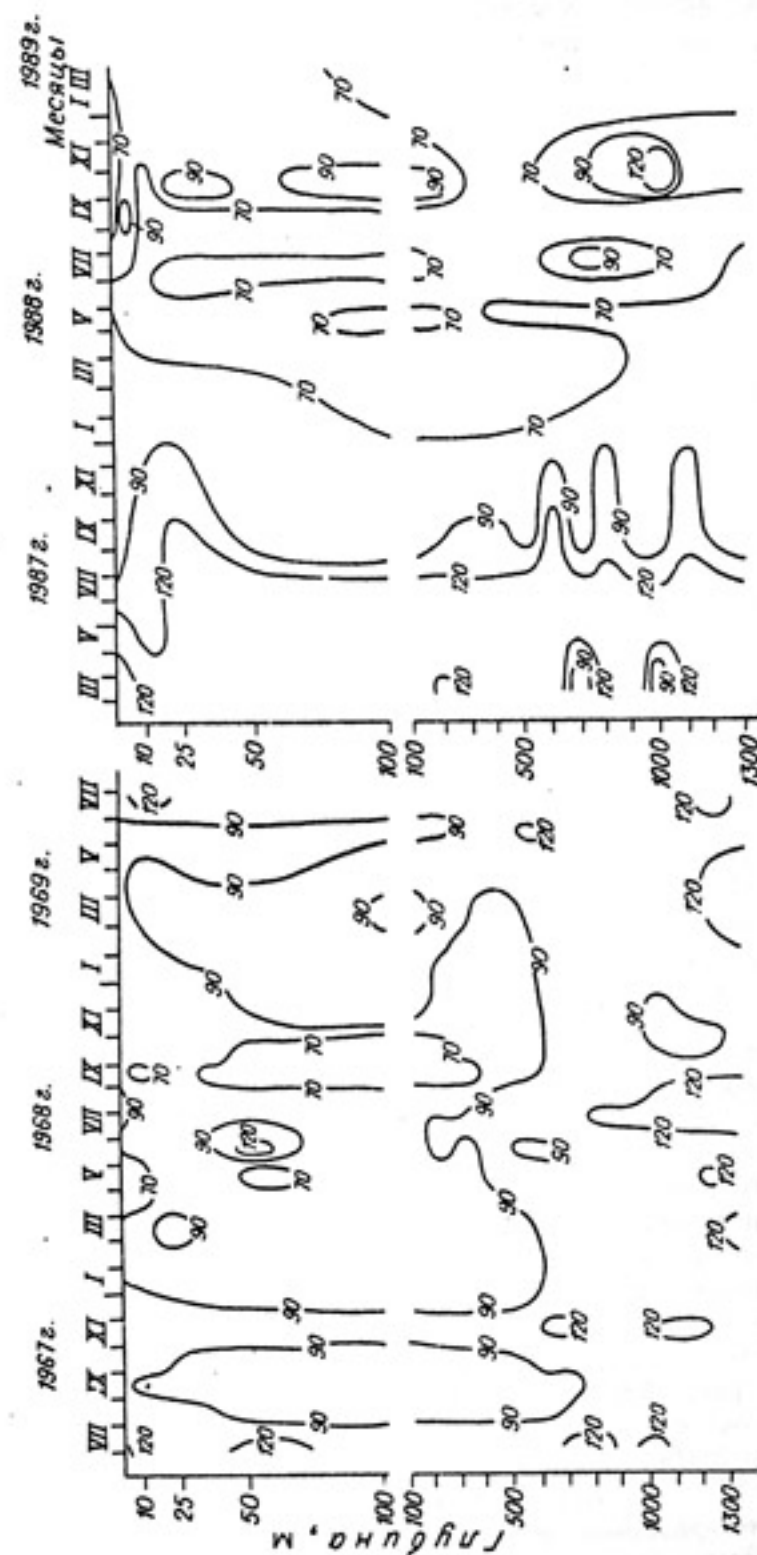


Рис. 46. Сезонные изменения $Si:P_{общ}$ в водах Южного Байкала (ст. 12 км от м. Половинный).

СТЕПЕНЬ УСТОЙЧИВОСТИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА НЕКОТОРЫХ АЛЛОХТОННЫХ И АВТОХТОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ВОДНОГО ГУМУСА БАЙКАЛА

В зависимости от особенностей биodeградации органические соединения можно подразделить на три большие группы:

- 1 – легко метаболизируемые большинством микроорганизмов (аминокислоты, моносахариды и органические кислоты);
- 2 – умеренно устойчивые к биохимическому разложению (целлюлоза и хитин);
- 3 – высокоустойчивые к биохимическому разложению (водный гумус).

Время круговорота легко метаболизируемых соединений составляет менее суток в гиперэвтрофных водах, несколько суток в эвтрофных водах, от нескольких суток до нескольких десятков в мезотрофных водах и несколько десятков суток в поверхностном слое олиготрофных вод. Время круговорота веществ умеренно устойчивых составляет от нескольких суток до нескольких десятков в гиперэвтрофных водах, от нескольких десятков суток до нескольких месяцев в эвтрофных, несколько месяцев в мезотрофных и несколько лет в олиготрофных поверхностных водах /Скопинцев, 1965; Секи, 1986; и др. /.

От времени же разложения высокоустойчивых компонентов органических компонентов органических веществ зависит круговорот всех биологически важных элементов /Секи, 1986/.

В течение значительной части года в большинстве природных вод в фотосинтезирующем слое водной толщи общая продукция органических веществ путем фотосинтеза фактически превышает их минерализацию. Это может компенсироваться либо активной седиментацией органических веществ, либо их переносом в ходе адвекции из мест, где они продуцируются. Однако при анализе баланса органических веществ в экосистеме оказывается, что более 90 % продуцируемых органических соединений в водных средах довольно быстро разлагаются. Оставшаяся фракция (гумус) довольно устойчива к биохимическому разложению. Однако в действительности его устойчивость не абсолютна.

В природных водах гумусовые вещества представляют собой полимеры кислот /Jackson, 1975/. Гумус создается частично автохтонно как побочный продукт микробиологических трансформаций разнообразных биохимических соединений, образующихся из мертвых клеток, и внеклеточных продуктов жизнедеятельности различных водных организмов. Некоторые водные гумусовые вещества продуцируются автохтонно из белков, углеводов и липидов попорослей. В морском гумусе содержатся также фенолы, которые образуются как внеклеточные продукты метаболизма морских водорослей. Другая часть гумуса может попадать в природные воды

и дождевые отложения с суши с поверхностными и подземными водами. Большая часть аллохтонных гумусовых веществ встречается в прибрежных районах водоемов. Основная часть гумуса наземного происхождения состоит из расщепленного лигнина волокнистых растений. Эти гумусовые вещества образуют комплексы с различными негумусовыми органическими соединениями, включая аминокислоты, углеводы, жирные кислоты, фенолы и порфирины. Эти биохимические метаболизируемые соединения, связанные с гумусом в определенной степени, защищены от микробного разложения /Degens et al., 1964/.

Свойства гумуса значительно варьируют в зависимости от природы образующих его веществ. Установлено, что некоторые их особенности связаны с воздействием факторов окружающей среды. Образование гумуса происходит как в аэробных, так и в анаэробных условиях, причем в первом случае более интенсивно. При образовании водного гумуса степень гумификации зависит от седиментации, в глубоководных отложениях гумус несколько более плотный, чем в мелководных.

Водный гумус осаждается в результате процессов флокуляции, адсорбции на частицах глины, включения в фекальные pellets фильтрующих беспозвоночных, образования агрегатов на пузырьках, а также под действием гидравлических факторов, регулирующих механическое отложение осадков. Осадочный гумус концентрируется главным образом в глине и иле прибрежных районов морей, а также пресноводных озер и рек. Способность глинистого материала к адсорбции зависит от характера минеральных и гумусовых соединений.

Гумус может оказывать неблагоприятное воздействие на водные экосистемы. Причинами низкой продуктивности некоторых богатых гумусом экосистем могут быть иммобилизация микроэлементов, поглощение света, повышенная кислотность и возможное присутствие антибиотиков, таких как фенолы. Однако положительное влияние водного гумуса безусловно больше. К одной из его полезных функций относится способность связывать металлы и обеспечивать катионный обмен. Удаляя тяжелые металлы и другие растворимые токсичные вещества, гумус способствует их детоксикации. Гумус также делает доступными для подорослей катионы питательных веществ, как Fe^{3+} , усиливает интенсивность дыхания и питания микробных клеток, выполняет определенные функции в физиологических процессах микроорганизмов и стимулирует их рост. Металлические гуматы играют важную роль в процессе связывания и высвобождения фосфатов. Однако наиболее благоприятное воздействие водного гумуса проявляется в том, что он способствует поддержанию стабильности водных экосистем, поскольку гумус имеет большое значение для функционирования биотической компоненты /Секи, 1986/.

Водные гумусовые соединения не могут быть полностью устойчивыми к биоразложению, поскольку они синтезируются в ре-

зультате биохимических реакций. Вследствие процессов гумификации элементы биохимических соединений из легко метаболизируемых форм переводятся частично в сравнительно устойчивые вещества. Гумификация замедляет среднюю скорость рециркуляции биологически важных элементов, что увеличивает стабильность органических веществ в водных экосистемах /Duursma, 1961; Скопинцев, 1965; Секи, 1986; и др. /.

Исходя из вышеизложенного, становится понятным важность исследований взаимодействия аллохтонных и автохтонных источников водного гумуса в водоемах. В Байкале они особенно актуальны для определения границ устойчивости экосистемы озера в связи с тем, что, согласно вертикальной зональности вод озера В. А. Толмачева /1957/, на автохтонный гумус в глубинной области воздействует органическое вещество, как правило, аллохтонного происхождения, источником которого могут быть притоки, атмосферные осадки, а также хозяйственные и промышленные сточные воды.

В данной главе мы рассматриваем степень устойчивости органического вещества как аллохтонных (сточные воды, атмосферные осадки), так и автохтонных (доминирующие в Байкале водоросли - мелозира, синедра и перидинеи) источников водного гумуса.

Изучение процесса разложения ОВ планктона (фито- и зоо-) издавна привлекает многих исследователей. Этому вопросу посвящено большое количество работ, подробный литературный обзор которых дан Б. А. Скопинцевым /1976/. Опыты проводились как в аэробных, так и в анаэробных условиях.

Отметим лишь, что все исследователи изучали динамику процесса разложения в основном по продуктам распада: Cooper /1935/ - по накоплению фосфатов, Brandt et al. /1937/ - по накоплению аммиачных соединений, Б. А. Скопинцев /1938, 1940/ - по БПК и минеральным продуктам распада, К. К. Вотинцев /1961/ - по перманганатной окисляемости, БПК и минеральным продуктам распада, В. М. Кудряшев /1972/ - по образующейся CO_2 , меченой по С. Hartmann, Wilderer /1968/ - по возрастанию ХПК в воде, Karma, Digiano /1968/ - по убыли кислорода в аппарате Варбута и др.

И только Б. А. Скопинцевым /1976/ и Е. М. Бикбулатовой и др. /1979/ впервые получена достаточно полная картина трансформации ОВ отмершего фитопланктона. Опыты ставились как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Изучена динамика взвешенного ОВ и продуктов его распада, предложен новый подход математического описания процессов распада ОВ и, наконец, дана количественная оценка влияния температуры.

Следует отметить, что авторами исследовался смешанный диатомовый планктон с относительно большой сухой массой и непродолжительное время.

Отметим, что схема постановки опытов в наших исследованиях и методы исследования аналогичны проведенным опытам по рас-

Таблица 40. Содержание органических компонентов во взвеси в опытах с синедрой + мелозирой, мг/л

Сроки отбора проб, сут	Сухая масса	C	Перманганатная окисляемость	N	P	Угле-воды	Белки
0	115	6,49	6,42	0,65	0,054	1,62	2,60
1	108	5,80	4,12	0,58	0,048	1,45	1,74
3	102	5,80	5,29	0,58	0,048	1,45	1,78
5	102	5,19	3,89	0,52	0,042	1,30	1,56
10	94	5,51	4,20	0,51	0,046	1,40	1,59
21	92	5,19	4,28	0,50	0,042	1,40	1,50
30	90	5,19	3,19	0,50	0,042	1,40	1,60
60	76	4,28	2,18	0,39	0,030	1,40	1,50
91	70	3,60	2,64	0,39	0,020	1,00	1,50
124	70	3,60	2,68	0,39	0,020	1,00	1,50

паду ОВ отмершего планктона в аэробных условиях Е. М. Бикбулатовой и др.¹ /1979/.

Опыты по распаду органического вещества отмерших доминирующих в Байкале мелозир, синедры и перидиней поставлены в 20-литровых бутылках на выдержанной в течение 6-8 мес и профильтрованной через мембранные фильтры 0,45 мкм байкальской воде. На протяжении всего периода эксперимента вода аэрировалась очищенным от CO₂ и NH₃ воздухом. Опыт проводился в темноте при 4-9 °С (в холодильнике). Взвесь для исследования выделялась на мембранные фильтры с нанесенным на них прокаленным порошком диоксида кремния /Скопинцев, Ларионов, 1979/. Наблюдения за изменением химических компонентов проводили как во взвеси, так и в фильтрате.

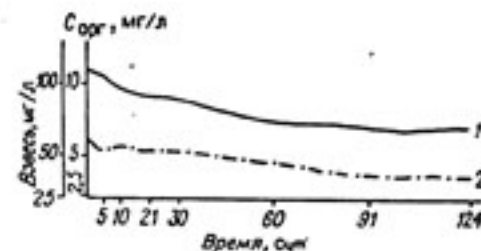
Синедра

Пойманный путем многократных ловов планктонной сетью № 64 28 мая 1977 г. планктон на 75 % состоял из синедры, на 10 % - из мелозир и на 15 % - из науплиусов эпишуры. Сухая масса водорослей достигала 115 мг/л.

Концентрация всех компонентов элементного и биохимического состава взвеси со временем уменьшалась (табл. 40, рис. 47), но с различной интенсивностью. Так, если на 30-е сутки уменьше-

¹ Авторы книги глубоко признательны Б. А. Скопинцеву, Е. М. Бикбулатовой и Э. С. Бикбулатову за помощь, консультации и ценные советы в проведении экспериментов.

Рис. 47. Содержание взвеси (1) и взвешенного C_{орг} (2) в эксперименте с синедрой.



ние составляло для сухой массы 21 %, углерода - 20, азота - 24, фосфора - 26 %, то уже на 91-е сутки оно было соответственно 39, 34, 40 и 63 %. Убыль фосфора идет значительно быстрее. По мере распада органического вещества отмершего планктона окисление его перманганатом калия в кислой среде понижается до 51 %, что подтверждает вывод Б. А. Скопинцева /1950/ о неполноте окисления органического вещества планктонного происхождения перманганатом калия в кислой среде.

Уменьшение содержания углеводов и белков аналогично таковому для компонентов органического вещества взвеси по элементному составу. Убыль концентрации белков идет значительно интенсивнее, чем углеводов. Так, если на 60-е сутки у углеводов она составляла всего 14 %, то за этот же срок у белков - 32 %. Отношение углерода углеводов к C_{орг} во взвеси составляет 10-11 %. Содержание белкового азота во взвешенном веществе исследуемого планктона колебалось от 47 до 65 % (табл. 41). Отношение органических форм углерода к фосфору (весовое) увеличивается со временем (от 120 в начале опыта до 180 на 91-е сутки). Отношение же органических форм углерода к азоту во взвешях за 124 сут почти не изменилось (9-10).

Таблица 41. Соотношение различных органических компонентов в опытах с синедрой + мелозирой (при 4-9 °С)

Сроки отбора проб, сут	$\frac{C_{\text{углев}}}{C_{\text{орг}}} \cdot 100$	$\frac{N_{\text{белк}}}{N_{\text{орг}}} \times 100$	$\frac{C_{\text{орг}}}{N_{\text{орг}}}$	$\frac{O_2 \text{ перманганатной окисляемости}}{C_{\text{орг}}}$	$\frac{C_{\text{орг}}}{P_{\text{орг}}}$
0	10,3	65	9,9	0,98	120
1	10,0	48*	10,0	0,72	120
3	10,0	48	10,0	0,90	120
5	10,0	48	9,9	0,74	123
10	10,0	47	10,8	0,76	120
21	11,0	48	10,3	0,82	123
30	10,0	52	10,3	0,61	123
60	11,0	62	10,9	0,51	143
91	11,0	62	9,0	0,69	180
124	11,0	62	9,0	0,74	180

Таблица 42. Содержания органических и неорганических компонентов и pH в опыте с синедрой + мелозиной

Сроки отбора проб, сут	N, мг/л			P-PO ₄ ³⁻ , мг/л	C:N	C _{орг}	N _{орг}	P _{орг}	pH
	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻						
0	0,0	0	0,25	0,017	15	3,1	0,40	0,029	7,8
1	Сл.	0	0,27	0,017	16	3,0	0,40	0,035	7,8
3	0,015	Сл.	0,25	0,027	10	2,8	0,40	0,025	7,8
5	0,400	0,005	0,25	0,065	510	2,8	-	-	7,8
10	0,45	0,0054	0,25	0,071	10	2,6	-	-	7,8
21	0,35	0,070	0,30	0,072	10	2,6	-	-	7,6
30	0,15	0,250	0,30	0,070	10	2,4	-	-	7,6
60	Сл.	0,004	0,80	0,080	10	2,0	-	-	7,6
91	Нет	Сл.	0,80	0,080	10	1,8	-	-	7,6
124	"	Нет	0,80	0,080	10	1,8	-	-	7,6

В фильтрате pH несколько уменьшился (от 7,8 до 7,6).

Как и следовало ожидать, с уменьшением содержания органического азота по взвеси в

воде появляются аммонийный азот (следы его отмечены уже на 1-й день после постановки опыта) и нитритный азот (следы его найдены на 3-й день) (табл. 42, рис. 48, а, б). Максимальное содержание аммонийного азота отмечено на 10-й день и составляло 0,45 мг/л, нитритного азота - на 30-й день (0,25 мг/л), но уже

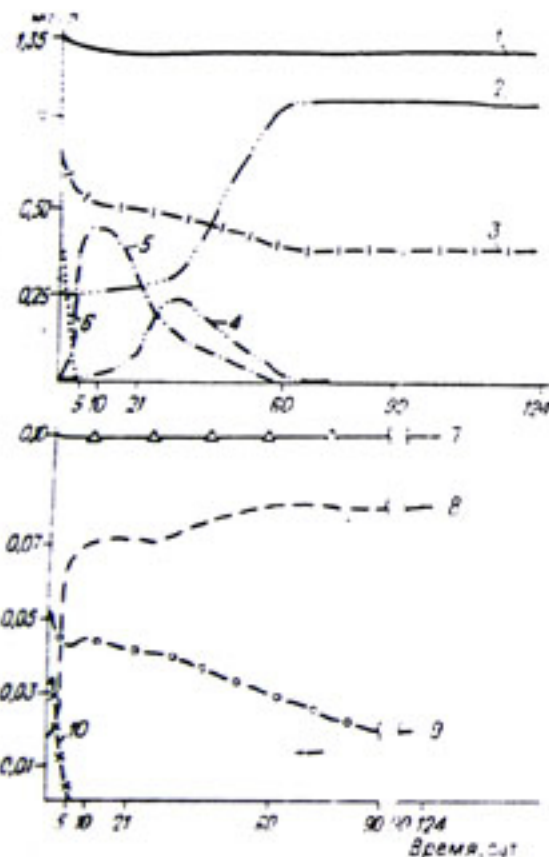
Рис. 48. Содержание азота (а) и фосфора (б) в эксперименте с синедрой.

1 - сумма N; 2 -

N-NO₃⁻; 3 - N_{орг} взвеш.; 4 - N-NO₂⁻;

5 - N-NH₄⁺; 6 - N_{орг} в воде; 7 - сумма P;

8 - P-PO₄³⁻; 9 - P_{орг} взвеш.; 10 - P_{орг} в воде.



на 91-й и на 124-й день соответственно этих веществ не обнаружено. Аммонийный и нитритный азот образуются в течение всего последующего периода распада, но, видимо, ввиду малого их количества они не могут быть определены применяемыми методами. Возрастание содержания нитратного азота начинается только на 60-й день (см. рис. 47, а).

Ввиду более быстрого распада взвешенного органического фосфора рост содержания фосфатного фосфора начинается уже с 5-го дня со времени постановки опыта (см. рис. 47, б).

В спектрах поглощения света растворенным веществом водной фазы в коротковолновой области отчетливо выражены два экстремума на спектральной кривой при длине волны 225 нм, по-видимому, они отражают появление нитритов и нитратов.

Эксперимент продолжался 360 дней. К концу опыта (10 марта 1978 г.) разложилось 80 % исходного органического вещества, т. е. трудноразлагаемая фракция органического вещества синедры составляла 20 % /Тарасова, 1982/.

Мелозира

Пойманный 15 марта 1979 г. планктон состоял из 97 % мелозиры и 3 % синедры. Сухая масса водорослей - 62 мг/л. Уменьшение ее и элементного состава ОВ взвесей практически одинаково. Так, если на 6-й день убыль сухой массы составляла 23%, C_{орг} - 22 и N_{орг} - 21 %, то на 62-й день уменьшение их составляло соответственно 48, 45 и 47 % (табл. 43, рис. 49). Как и в предыдущем опыте, несколько интенсивнее распадается P_{орг}. Уже на 32-й день его содержание убыло на 45 %, а на 62-й день - на 52 %. Но интенсивность убыли P_{орг} при распа-

Таблица 43. Изменение содержания органических компонентов во взвеси в опытах с мелозиной + синедрой, мг/л

Сроки отбора проб, сут	Сухая масса	C	Перманганатная окисляемость	N	P	Углеводы	Белки
0	62	3,60	3,56	0,38	0,033	0,88	1,60
1	55	3,24	2,92	0,35	0,031	0,79	1,28
4	50	2,88	2,59	0,34	0,028	0,70	1,12
6	48	2,81	2,47	0,30	0,025	0,69	1,12
11	43	2,52	2,14	0,28	0,022	0,66	1,04
20	40	2,38	1,90	0,23	0,021	0,62	1,00
32	36	2,16	1,54	0,22	0,018	0,62	0,90
62	32	1,98	1,49	0,20	0,016	0,53	0,90
99	30	1,80	1,28	0,20	0,016	0,48	0,90

Таблица 44. Соотношение различных органических компонентов в опытах с мелозирой + синедрой (взвесь)

Сроки отбора проб, сут	$\frac{C_{\text{углев.}}}{C_{\text{орг}}} \cdot 100$	$\frac{N_{\text{белк.}}}{N_{\text{орг}}} \cdot 100$	$\frac{C_{\text{орг}}}{N_{\text{орг}}}$	$\frac{O_2 \text{ перманганатной окисляемости}}{C_{\text{орг}}}$	$\frac{C_{\text{орг}}}{P_{\text{орг}}}$
0	10,5	67	9,5	0,99	110
1	9,8	59	9,0	0,90	95
4	9,8	53	9,6	0,89	100
6	9,8	59	9,3	0,88	112
11	10,4	59	9,0	0,84	114
20	10,4	69	10,0	0,79	113
32	11,4	65	9,8	0,71	120
62	10,8	72	9,9	0,75	123
99	10,6	72	9,0	0,71	114

де органического вещества синедры даже при 4-9 °С значительно большая, нежели таковая при распаде ОВ мелозеры (см. табл. 40, рис. 47).

Если в первом опыте отношение органических форм углерода к фосфору увеличивалось от 120 до 180, то указанное отношение в опыте с мелозирой повысилось незначительно (от 100 до 120). Отношения органических форм углерода к азоту колеблются в пределах 9-10. Окисление взвешенного ОВ мелозеры со временем перманганатом калия в кислой среде понижается до 71 % (табл. 44). Аналогичные данные получены и при изучении распада ОВ синедры. Уменьшение содержания белков идет интенсивнее, чем таковое для углеводов. Если убыль содержания углеводов во взвеси на 6-й день составляла 22 %, а белков - 30 %, то на 32-й день она была соответственно 30 и 44 %. Отношение углеводов к $C_{\text{орг}}$ взвесей составляет 10-11 % (см. табл. 44).

Содержание белкового азота во взвеси изменяется от 59 до 72 %. За время опыта pH в фильтрате изменялась от 7,8 до 7,6.

Аммонийный азот обнаружен на 4-й день и максимум (0,13 мг/л) его приходится на 11-й день. На 6-й день появляется и

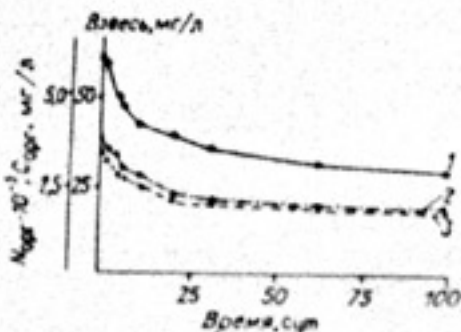


Рис. 49. Содержание взвеси (1) и взвешенных форм $C_{\text{орг}}$ (2) $N_{\text{орг}}$ (3) в эксперименте с мелозирой.

нитритный азот, максимальное его содержание (0,12 мг/л) найдено на 32-й день от начала постановки эксперимента. Концентрация нитратного азота до 62-го дня остается без изменений, затем она возрастет (табл. 45, рис. 50, а).

Содержание же фосфатного фосфора повышается уже с 4-го дня достаточно медленно, но уже на 62-й день оно увеличивается в 2 раза, в то время как содержание нитратного азота удваивается только к 99-му дню (см. рис. 50, б).

Органические формы азота и фосфора обнаруживаются только в течение 4 дней. По-видимому, это объясняется малой исходной сухой массой водорослей.

Спектры поглощения света растворенными веществами водной фазы измерены в ультрафиолетовой и видимой областях воли 225, 250, 275, 300, 325, 440 и 620 нм. Экстинкция на участке длин волн от 225 до 275 нм со временем понижалась. Ее повышение со временем при длине волны 225 нм несомненно связано с накоплением в растворе нитратного азота.

Как и в эксперименте распада органического вещества отмершей синедры, органическое вещество мелозеры также состоит из легко-

Таблица 45. Изменение pH, содержания органических и неорганических компонентов в воде в опыте с мелозирой + синедрой

Сроки отбора проб, сут	N, мг/л			P- PO_4^{3-} , мг/л	C:N	$C_{\text{орг}}$	$N_{\text{орг}}$	P $_{\text{орг}}$	pH
	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-						
0	0	0	0,27	0,017	16	1,15	Сл.	0,0120	7,8
1	0	0	0,29	0,017	17	1,10	"	0,0115	7,8
4	0,01	0	0,29	0,022	14	0,90	"	0,0090	7,8
6	0,08	0,02	0,28	0,025	14	0,90	"	"	7,8
11	0,13	0,005	0,27	0,028	14	0,88	"	"	7,8
20	0,06	0,080	0,28	0,030	14	0,80	"	"	7,6
32	0,03	0,120	0,28	0,032	13	0,80	"	"	7,6
62	Сл.	0,08	0,37	0,034	13	0,78	"	"	7,6
99	Нет	Сл.	0,45	0,034	13	0,78	"	"	7,6

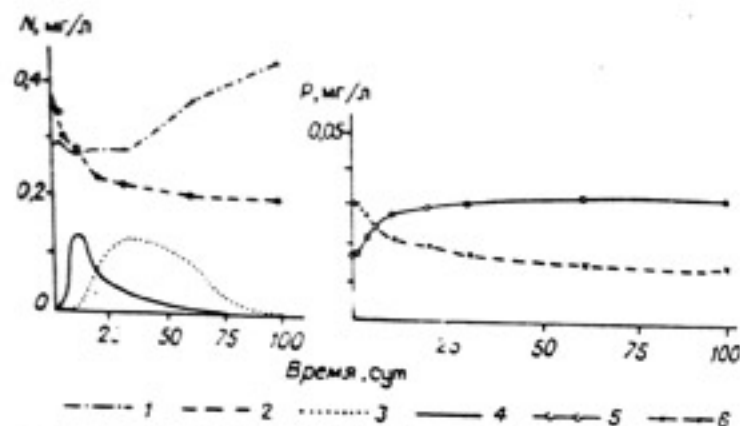


Рис. 50. Содержание азота (а) и фосфора (б) в эксперименте с мелозирой.

1 - $N-NO_3^-$; 2 - N_{org} ; 3 - $N-NO_2^-$; 4 - $N-NH_4^+$; 5 - $P-PO_4^{3-}$; 6 - P_{org} .

разлагаемой (лабильной) и трудноразлагаемой (стабильной) фракций. Распад лабильной фракции заканчивается в первые 20-30 дней.

Гимнодиниум (перидинеи)

Эксперимент поставлен 12 апреля 1979 г. при $4^\circ C$ с фитопланктоном следующего состава - 90 % перидиней, 8 % мелозир и 2 % синедр. Сухая масса водорослей составляла 16 мг/л. В связи с лизисом исследованного фитопланктона при повышении температуры, принимая во внимание, что сухая масса водорослей служит такой же надежной характеристикой скорости разложения их органического вещества, наблюдение проводили за изменением во времени сухой массы перидиней. Уменьшение сухой массы гимнодиниума происходит достаточно интенсивно: уже на 1-е сутки убыль составляла 31 %, на 13-е - 61, а на 32-е - 82 % (рис. 51).

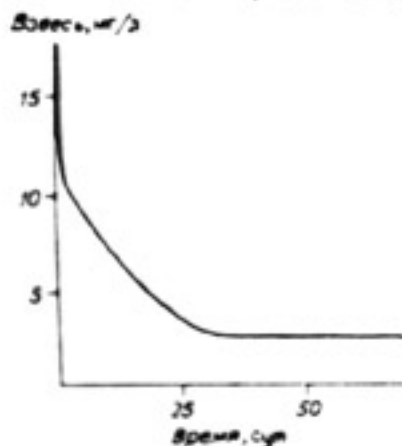
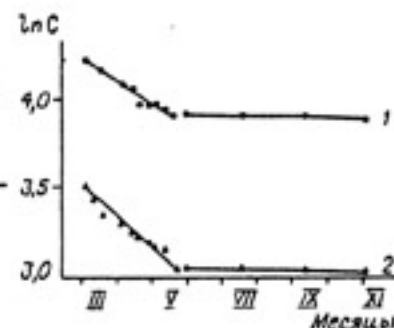


Рис. 51. Содержание перидиней в эксперименте с перидинейми.

Рис. 52. Бихроматная окисляемость в эксперименте со сточными водами БЦБК (1) и в разбавлении их байкальской водой (2) (1951 г.).



Сточные воды сульфат-целлюлозного производства и хозяйственные стоки

Наблюдения за изменением органического вещества проводились как в неразбавленных сточных водах БЦБК, сбрасываемых в озеро после биологической и химической очистки, так и при разбавлении их чистой байкальской водой в соотношении 1:1 [Тарасова, 1972; Тарасова, Галкин, 1980]. Опыты были поставлены в холодильнике при $4-9^\circ C$. Органическое вещество определяли методом мокрого сжигания (ХПК).

Эксперимент длился со 2 марта по 3 ноября 1971 г. Получено, что распад органического вещества очищенных сточных вод идет крайне медленно. Так, за весь период исследования содержание его в сточных водах уменьшилось на 29 %, в разбавленных 1:1 водах - несколько больше (на 39 %). Наиболее резкая убыль в сточных водах произошла со 2 марта по 30 мая и составила 27 %. В разбавленных сточных водах за этот же период распалось несколько большее количество органического вещества (37 %). Следовательно, в сточных водах БЦБК до 73 % органическое вещество представлено трудноразлагаемой фракцией.

При построении полулгарифмической прямой (рис. 52) по методу наименьших квадратов были рассчитаны константы скорости распада органического вещества в неразбавленных и разбавленных сточных водах:

	со 2/III по 11/V 1971 г.	с 30/V по 3/XI 1971 г.
Сточные воды пруда-аэротатора	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Разбавленные 1:1 сточные воды	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$

Низкая доля лабильной фракции органического вещества обнаружена нами при температуре $4-9^\circ C$ и в хозяйственных сточных водах (20 %) при продолжительности эксперимента в течение 60 сут [Тарасова и др., 1986]. Начальная концентрация взвешенных веществ в них составляла 30,0 мг/л и C_{org} 16,7 мг/л.

Скорость медленного распада органического вещества, по-видимому, объяснялась значительным количеством жиров, липидитическая микрофлора в условиях пониженной температуры почти не развивалась.

Атмосферные осадки

Ввиду значительной доли атмосферного поступления азота и фосфора от их выноса с речным стоком в Байкал следует рассмотреть вопрос об устойчивости их соединений в байкальской воде. Соотношение лабильных и трудноразлагаемых форм азота и фосфора в атмосферных осадках было изучено экспериментально. Опыт был поставлен в аэробных условиях при температуре 4–9 °C на выдержанной в течение 6 мес. затем профильтрованной байкальской воде (она же без добавления снега служила контролем). Исследования проводили как с добавлением "чистого" снега, отобранного в пос. Листаянка, так и "грязного" (в районе БЦБК) по схеме Зобелла /1946/: с добавлением сулемы (угнетение бактериальных процессов), тимола (угнетение ферментативных процессов) и без добавок. Наблюдения за изменением содержания азота и фосфора во взвеси проводили в течение 62 сут. О правильности постановки эксперимента судили по неизменному балансу азота и фосфора в нефильтрованной воде в течение всего периода исследования. К концу опыта в снеге у БЦБК трансформировалось всего 17 % N и 27 % P в чистом снеге убыль их составляла 40 % (табл. 46).

Описанные выше экспериментальные исследования позволяют сделать вывод, что высокое количество трудноразлагаемой фракции ОБ в сточных водах БЦБК, хозяйственных стоках и загрязненных атмосферных осадках способствует его долгому сохранению в озере и накоплению в нем.

Таблица 46. Изменение содержания N и P во взвеси в опытах с "чистым" снегом и снегом у БЦБК

Сроки отбора проб, сут	"Чистый" снег				N:P ат.	Снег у БЦБК				N:P ат.
	N		P			N		P		
	мкг/л	%	мкг/л	%		мкг/л	%	мкг/л	%	
0	100±2	100	10±1	100	22	400±2	100	260±2	100	3
1	108±2	108	12±1	120	20	420±5	105	290±2	112	3
6	95±1	95	9±0,5	90	23	360±2	90	230±2	89	4
16	95±1	90	9±0,5	80	25	360±2	90	235±2	90	3
26	75±1	75	7±0,5	70	23	350±2	88	210±1	81	4
30	70±1	70	7±0	70	22	340±2	85	200±1	77	4
62	60±1	60	6±0	60	23	330±2	83	190±1	73	4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в настоящей работе материалы, характеризующие ионный состав за 1970–1971, 1981–1985 гг., органическое вещество и биогенные элементы за 1967–1989 гг. в водах Байкала, его притоках и атмосферных осадках над акваторией озера, при сравнении их с данными 1950–1955 гг. позволили оценить современное состояние гидрохимического режима оз. Байкал как с точки зрения загрязнения, так и возможного их эвтрофирования.

За показатели загрязнения приняты обусловленные хозяйственной деятельностью человека минеральные вещества, в том числе сульфаты и хлориды, нефтепродукты (углеводороды), фенолы, а также растворенные вещества.

По сравнению с 50-ми годами в исследуемый период увеличился сток сульфатов, хлоридов и органического вещества. Основная роль в увеличении приноса в озеро названных веществ принадлежит Селенге и Верх. Ангारे, со стоком которых поступает 2/3 сульфатов, более 80 % хлоридов и примерно 70 % органического вещества от общего поступления этих веществ с речными водами. Изменение химического стока по сравнению с 50-ми годами в значительной степени обусловлено увеличением концентрации в речных водах ряда компонентов. Так, в Селенге и Верх. Ангаре при увеличении стока воды соответственно на 2 и 17 % сток сульфатов возрос на 51 и 35 %, хлоридов – на 29 и 40 %, органического вещества – на 52 и 94 %. Существенно возросло поступление указанных компонентов из притоков Южного Байкала, хотя их водность увеличилась по сравнению с 50-ми годами в основном лишь на 10–15 %. Так, сток сульфатов увеличился в реках Мысовая и Мантуриха в 1,9 раза, в Половинной – в 2,4, хлоридов в Снежной и Бол. Сухой – соответственно в 4,4 и 4, в Мантурихе и Мысовой – в 2,0 и 2,5 раза.

Доля атмосферной составляющей от речного ионного стока в химическом балансе Байкала увеличилась от 1,5 % в 50-х годах до 5,0 % в 1976–1984 гг. /Вотинцев и др., 1983/. Особенно возросло поступление на акваторию озера SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , NH_4^+ , PO_4^{3-} и Si. Более чем в 2 раза увеличилось поступление органического вещества. Основная часть расхода вещества

(сток с водами Ангары) практически не изменялась за сравниваемые периоды.

Сравнивая среднегодовое накопление в Байкале компонентов ионного состава в 50-х и в 70-80-х годах, следует отметить, что в последнее время происходит увеличение их избытка, особенно заметное для Cl^- и SO_4^{2-} . Если в 50-х годах скорость накопления Cl^- составляла 0,001 мг/л, то в настоящее время - 0,002, для SO_4^{2-} - 0,003 и 0,01 мг/л, для суммы ионов - 0,009 и 0,08 мг/л соответственно.

Вклад от сточных вод и атмосферных выбросов БЦБК, СЦКК с атмосферными выбросами Ангарско-Иркутского промузла и антропогенным стоком притоков составил по сульфатам 162 тыс. т, по хлоридам 27,2 тыс. т.

Наибольшую нагрузку от результатов хозяйственной деятельности испытывает Южный Байкал, где поступление веществ антропогенного происхождения на единицу площади превышает аналогичную величину для Среднего и Северного Байкала, в том числе по сульфатам в 5,1 раза, по хлоридам - в 3,9 раза. Сточные воды и атмосферные выбросы БЦБК вносят в южную часть озера 29,1 % минеральных веществ, в том числе 55 % хлоридов и 39 % сульфатов.

Результаты ежемесячных определений содержания сульфатов на глубоководных станциях в Южном Байкале с 1957 по 1987 г. позволили прийти к выводу, что нельзя рассматривать ионный состав байкальских вод как вполне однородный и неизменный. Фоновая концентрация сульфатов не является единой (5,2 мг/л), как представлялось ранее, для всей открытой части озера. Так, для вод ст. 12 км от м. Полонинный (20 км от БЦБК) она равна 3,9 мг/л, для вод станций в 7 и 15 км от м. Березовый - 4,7 и 4,8 мг/л соответственно.

Оценку возможного эвтрофирования Байкала провели исходя из изменчивости содержания взвешенных веществ, хлорофилла "а", элементного состава (C, N, P, Si) взвеси и нефилтрованных вод озера, его притоков и атмосферных осадков.

Сравнение сезонных изменений содержания взвеси, органического вещества и биогенных элементов в пелагиали Байкала в 1986-1989 гг. с 1967-1969 и 1982-1985 гг. (на примере глубоководной станции Южного Байкала) показало, что в последние годы в трофическом слое отмечались повышенные значения перечисленных выше компонентов в течение всего периода открытой воды с их максимумом осенью. Для 1967-1969 гг. для их концентрации было характерно наличие двух четко выраженных максимумов и двух минимумов, которые совпадали с сезонными явлениями в развитии планктонных организмов.

Средневозвешенные в слое 0-1300 м нефилтрованных вод концентрации исследуемых компонентов в 1986-1989 гг. практически остались на уровне высокоурожайных по развитию фитопланк-

Таблица 47. Средневозвешенные значения содержания некоторых компонентов трофического статуса Байкала

Годы исследования	Взвесь, мг/л	Хлорофилл "а", мкг/л	C _{орг} , мг/л	N-NO ₃ ⁻	N _{орг}	P-PO ₄ ³⁻	P _{орг}
				мкг/л			
1967-1969	0,53±0,10	-	0,87±0,05	92±5	81±7	11±1	4±1
1982-1984	0,48±0,11	0,19±0,15	1,04±0,18	81±10	63±30	-	-
1986-1989	0,57±0,16	0,16±0,11	1,04±0,13	84±10	103±50	10±2	9±3

тона 1967-1969 годов, кроме P_{орг}, для которого отмечено увеличение его содержания (табл. 47).

Среднее в слое 0-1300 м содержание взвешенного C_{орг} в общем количестве взвеси в 1986-1988 гг. увеличилось в 5,75 раза по сравнению с 1968-1969 гг., а в общем количестве C_{орг} - в 3 раза.

Концентрация азота во взвеси в 1986-1988 гг. по средним значениям возросла в 5 раз, а взвешенного фосфора - в 2 раза по сравнению с таковыми в 1983-1984 гг.

Существенное изменение в исследуемый период по сравнению с 1967-1969 гг. обнаружено в характере вертикального распределения минеральных и органических форм азота и фосфора. Если в 1967-1969 гг. происходило увеличение содержания минеральных и уменьшение органических их форм, то в 1986-1989 гг. на горизонтах свыше 100 м наблюдалось синхронное изменение их значений. По нашему мнению, одной из основных причин столь существенного изменения закономерностей распределения азота и фосфора в глубинной области является процесс опускания верхней зоны вод в нижнюю (и наоборот) вдоль склона, впервые для Байкала обнаруженный В. А. Толмачевым /1957/. Это предположение находит подтверждение и в изменчивости содержания сульфатов с глубиной в водах открытой части озера с 1967 по 1987 г. Рассмотрены основные источники, определяющие динамику органического вещества и биогенных элементов в водах озера - воды притоков и атмосферные осадки.

Воды притоков Байкала разнятся по количеству и качественному составу органического вещества, водной взвеси, хлорофиллу "а" и биогенным компонентам.

В последние годы обнаружено существенное возрастание зимних концентраций P_{орг} в водах самого крупного притока озера - в р. Селенге от 7-8 мкг/л в 1968 г. до 150-440 мкг/л в 1987 г.

Поступление азота с речными водами за 1968-1987 гг. зависит

от количества водного стока (коэффициент корреляции составляет 0,90), для стока фосфора связь слабая (коэффициент корреляции 0,67). Воды Селенги приносят в озеро до 40, а в иные годы и до 60 % азота и фосфора.

Ежегодное поступление азота в озеро в 1968-1987 гг. с притоками составляет 19,1 тыс. т (при колебании от 10,4 до 25,6 тыс. т), фосфора - 1,6 (1,5-1,7) тыс. т.

Атмосферное поступление на акваторию озера только растворенных форм азота и фосфора по сравнению с речным стоком составляет соответственно 37 и 44 %. Ежегодный запас азота и фосфора из озера через Ангару в среднем за 1968-1987 гг. составил 9,6 тыс. т азота и 1,1 тыс. т фосфора. Получено, что в озере аккумулируется от 50 до 70 % поступающих биогенных веществ.

Внешняя биогенная нагрузка на Байкал по азоту составляла 0,832, по фосфору - 0,073 г/м в год. Фосфорная нагрузка Байкала близка к таковой для оз. Онежского и несколько выше, чем для озера Гурон и Верхнего.

Байкал не является исключением и в том, что большую роль в поступлении азота и фосфора в озеро играют атмосферные осадки. Так, атмосферный принос фосфора в Балтийское море составляет 30 % от вносимого реками /Неринг и др., 1981/, в оз. Нарочь атмосферные осадки поставляют до 50 % азота и 60 % фосфора. Атмосферный поток фосфора на акваторию Байкала (22,5 мг/(м²·год)) несколько ниже, чем поток фосфора из атмосферы на водоемы США - 10-60 мг/м² в год /Singer, 1969/ или на почву в европейской части СССР - 20-80 мг/м² /Дроздова и др., 1964/.

Рассчитанная нами по разности между седиментацией и аккумуляцией фосфора внутренняя фосфорная нагрузка оказалась близкой (0,047 г P/м² в год) к теоретическим расчетам, выполненным для Байкала И.Б. Мизандроновым /1970/ (0,035 г P/(м²·год)).

Анализ изменчивости отношений C:N, C:P минеральных и органических форм N:P, а также Si:P и Si:N в водах Байкала в 1967-1969 гг. показал, что развитие мелозир байкальской возможно при Si:P > 90 в зимнее время. Оно ограничивается содержанием фосфора (в трофическом слое N:P минеральных форм возрастает до 54, Si:P - до 800). Мелозира байкальская более требовательна к таким ^{мини}элементам, как Si и P, чем синедра. Если зимой отношение Si:P < 90, то в массе развивается синедра. При промежуточном отношении Si:P = 70-90 в зимнее время возможно совместное развитие мелозир и синедры.

От периода слабой антропогенной нагрузки (1983-1984 гг.) до сравнительного большого антропогенного воздействия на воды открытой части озера в 1986-1989 гг. происходит переход вод озера от среднего лимитирования по азоту (C:N во взвеси в трофическом слое > 10) до полного отсутствия N-лимитации в развитии фитопланктонного сообщества (C:N < 5).

Обнаруженная обратная корреляция между зимним содержанием азота и весенней концентрацией хлорофилла "а" в водах Байкала и обратная зависимость между взвесью и хлорофиллом "а" зимой в Селенге в последние годы позволяют сделать вывод, что в настоящее время озеру в большей степени угрожает загрязнение токсикантами, нежели эвтрофирование его вод. Подтверждением сделанного вывода служит нахождение высокотоксичных полихлорированных бифенилов (ПХБ) в жире нерпы (до 38 мкг/г при ПДК = 2,5 мкг/г /Митрошков и др., 1990/). Нами обнаружено содержание ПХБ в планктоне озера (до 6,92 мкг/г сухой массы).

Развитие весенних форм фитопланктона в исследуемый период не наблюдалось, несмотря на оптимальные отношения (Si:P > 100) в зимний период.

Сбалансированная экосистема озера, приспособленная к ритмическому поступлению биогенных веществ (паводки и межени в реках), легко нарушается при увеличении внешней биогенной нагрузки. При уменьшении же ее экосистема озера может относительно быстро восстановиться. В противном случае возможно возрастание внутренней биогенной нагрузки в озеро, что уже приведет к необратимым процессам. Насколько быстро пойдет процесс извлечения внутренней нагрузки в озеро, зависит от стабильности гумусовых веществ.

Началом этих исследований как определения устойчивости экосистемы оз. Байкал (показателя Олсона) являются материалы по степени распада органического вещества некоторых аллохтонных и автохтонных источников гумусовых веществ. Экспериментально установлено, что органическое вещество атмосферных осадков в загрязненных районах, сточных водах БЦБК и хозяйственных стоках на 70-80 % состоит из трудноразлагаемой фракции. В то время как органическое вещество отмерших доминирующих в Байкале форм фитопланктона (мелозира, синедра и перидиней) до 70-87 % представлено лабильной фракцией. В дальнейшем планируется постановка экспериментов по взаимодействию разных источников гумусовых веществ, что в конечном счете позволит установить границы устойчивости экосистемы озера и возможную биогенную нагрузку на нее.

**E. R. TARASOVA, A. I. MESHCHERYAKOVA,
MODERN STATE OF HYDROCHEMICAL REGIME
OF LAKE BAIKAL**

... research over components of ion content (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-}) of suspension, chlorophyll "a", organic substance and biogenic elements in Baikal water, its affluents and atmosphere sediments showed that for the last 30 years considerable changes took place in their content, which were brought in with affluents and atmosphere.

The delivery into the lake of SO_4^{2-} , Cl^- and organic substance increased very much. South Baikal water has the largest anthropogenous load.

The disturbance of seasonal regularities and vertical distribution of suspension, organic substances and biogenic elements in the open part of the lake as well as rhythmicity of nitrogen and phosphorus drainage has been noticed.

The discovered back correlation between NO_3^- content in winter and spring concentration of chlorophyll "a" in Baikal waters as well as back dependence of suspended substance and chlorophyll "a" in winter in the Selenga River waters allows to arrive at the conclusion that at the present time toxicants are more dangerous than eutrophication for Baikal water. It is confirmed by high content of polychlorinated biphenyl in the fat of seal (38 mcg/g with MPA = 2.5 mcg/g) and plankton of the lake (up to 6.92 mcg/g).

- Алексин О. А. Общая гидрохимия. - М.: Гидрометеонадат, 1958. - 208 с.
- Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. - Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1982. - 302 с.
- Афанасьев А. Н. Водный баланс озера Байкал // Труды Байкал. лимнол. ст. АН СССР. - 1960. - Т. 18. - С. 155-241.
- Афанасьев А. Н. Водные ресурсы и водный бассейн озера Байкал. - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1976. - 238 с.
- Афанасьева Э. Л. Биология байкальской эпишуры. - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1977. - 143 с.
- Вихбулатова Е. М., Скопинцев Б. А., Вихбулатов Э. С. Изменение химического состава воды и взвесей при распаде органического вещества фитопланктона в аэробных условиях // Микробиологические и химические процессы деструкции органического вещества в водоемах. - Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1979. - С. 187-203.
- Богданов В. Т. О распределении речных вод в северной оконечности Байкала по гидрохимическим данным // Докл. АН СССР. - 1969. - Т. 185, № 3. - С. 649-652.
- Богданов В. Т. Формирование гидрохимического режима Северного Байкала. - Новосибирск: Наука Сиб. отд-ние, 1978. - 136 с.
- Верболов В. И. Течения навигационного периода // Течения в Байкале. - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1977. - С. 43-62.
- Верещагин Г. Ю. Некоторые данные о режиме глубинных вод Байкала в районе Маритуга // Тр. Комиссии по изучению оз. Байкал. - 1927. - Т. 2. - С. 77-138.
- Верещагин Г. Ю. Суточный ход некоторых гидрологических элементов на Байкале и его лимнологическое значение // Тр. Байкал. лимнол. ст. АН СССР. - 1932. - Т. 2. - С. 107-200.
- Верещагин Г. Ю. Методы полевого гидрохимического анализа в их применении к гидрологической практике. - Л.: Гос. гидрол. ин-т, 1933. - 135 с.
- Верещагин Г. Ю. Основные черты вертикального распределения динамики водных масс на Байкале // Академику В. И. Вернадскому. - М.: Изд-во АН СССР, 1937. - Т. 2. - С. 1207-1230.
- Верещагин Г. Ю. Байкал. Научно-популярный очерк. - Иркутск, 1947. - 168 с.
- Верещагин Г. Ю. Байкал. - М.: Географгиз, 1949. - 228 с.
- Ветров В. А., Кузнецова А. И. Базовые уровни содержания металлов в различных частях водной массы оз. Байкал // География и природные ресурсы. - 1983. - № 3. - С. 121-129.
- Викберг Г. Г. Первичная продуктивность водоемов. - Минск, 1960. - 256 с.

- Виноградов А. П. Химический состав планктона // Тр. Биогеохим. лаб. АН СССР. - 1939. - Т. 3. - С. 32-38.
- Вотинцев К. К. Химический состав атмосферных осадков Прибайкалья // Докл. АН СССР. - 1954. - Т. 95, № 5. - С. 979-981.
- Вотинцев К. К. Пути миграции кремния в оз. Байкал // Тр. Всесоюз. гидробиол. о-ва. - 1955. - Т. 6. - С. 70-79.
- Вотинцев К. К. Азот и фосфор в водах озера Байкал // Там же. - 1956. - Т. 7. - С. 24-36.
- Вотинцев К. К. Некоторые итоги гидрохимических исследований оз. Байкал // Изв. СО АН СССР. - 1958. - № 2. - С. 87-98.
- Вотинцев К. К. О распределении вод р. Селенги в оз. Байкал в летне-осенний период // Докл. АН СССР. - 1960. - Т. 131, № 3. - С. 620-623.
- Вотинцев К. К. Гидрохимия озера Байкал // Тр. Байкал. лимнол. ст. АН СССР. - 1961а. - Т. 20. - 311 с.
- Вотинцев К. К. О роли фотосинтетической аэрации в круговороте органического вещества в озере Байкал // Докл. АН СССР. - 1961б. - Т. 139, № 1. - С. 519-522.
- Вотинцев К. К. Гидрохимические условия в глубинной области оз. Байкал // Тр. ЛИН СО АН СССР. - 1965. - Т. 6(26). - С. 71-114.
- Вотинцев К. К. К вопросу о современном осадкообразовании в Байкале // Докл. АН СССР. - 1967а. - Т. 174, № 2. - С. 419-422.
- Вотинцев К. К. Химический баланс как показатель процессов круговорота вещества в озерах (на примере оз. Байкал) // II Всесоюз. лимнол. совещание: Тез. докл. - Ливенничное-на-Байкале, 1967б. - С. 87-95.
- Вотинцев К. К. Проблема первичной продукции водоемов и ее лимнологическое значение // Материалы XIV конференции по изучению внутренних водоемов Прибалтики. - Рига: Зинатне, 1968. - Т. 3, № 1. - С. 27-32.
- Вотинцев К. К. Роль продуктов химической денудации суши в осадконакоплении в пресных озерах // II Всесоюз. лимнол. совещание. - Ливенничное-на-Байкале, 1969. - Ч. 2. - С. 68-69.
- Вотинцев К. К. Химическая денудация в бассейне Байкала и роль ее продуктов в осадконакоплении в озере // Донные отложения Байкала. - М.: Наука, 1970. - С. 64-68.
- Вотинцев К. К. Биоэнергетическая структура экосистемы пелагиали озера Байкал // Зоол. журн. - 1971а. - Т. 50, вып. 2. - С. 165-172.
- Вотинцев К. К. Биоэнергетическая трансформация и баланс органического вещества в пелагиали Байкала // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1971б. - С. 48-54.
- Вотинцев К. К. Первичная продукция Байкала и ее значение в биологических процессах в озере // Изв. АН СССР. Сер. биол. - 1971в. - № 6. - С. 892-900.
- Вотинцев К. К. Продукция бактерий пелагиали оз. Байкал по данным баланса органического вещества // Гидробиол. журн. - 1971г. - Т. 7, № 1. - С. 72-75.
- Вотинцев К. К. Гидрохимия // Проблемы Байкала. - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1978. - С. 124-144.
- Вотинцев К. К. Круговорот органического вещества и биогенных элементов в озере Байкал // IV Всесоюз. симпозиум по органическому веществу и биогенным элементам во внутренних водоемах: Тез. докл. - Петрозаводск, 1983. - С. 25-26.
- Вотинцев К. К. Основные черты гидрохимии озера Байкал // Водные ресурсы. - 1985. - № 2. - С. 43-62.
- Вотинцев К. К., Галазий Г. И. О возможном влиянии сточных вод на фауну Байкала // Биологическая продуктивность водоемов Сибири. - М.: Наука, 1969. - С. 243-249.
- Вотинцев К. К., Галазий Г. И. Гидрохимия и охрана вод озера Байкал // Фундаментальные исследования. Науки о Земле. - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1977. - С. 178-184.
- Вотинцев К. К., Глазунов И. В. Гидрохимический режим озера Байкал в районе пос. Ливенничного // Тр. ин-та ЛИН СО АН СССР. - 1963. - Т. 3(23). - С. 3-57.
- Вотинцев К. К., Глазунов И. В., Толмачева А. П. Гидрохимия рек бассейна озера Байкал // Тр. ин-та ЛИН СО АН СССР. - 1965. - Т. 8(28). - 495 с.
- Вотинцев К. К., Мешерякова А. И. Роль золотого переноса в формировании дольных отложений и химического состава вод Байкала // Докл. АН СССР. - 1961. - Т. 141, № 6. - С. 1426-1428.
- Вотинцев К. К., Мешерякова А. И., Поповская Г. И. Круговорот органического вещества в озере Байкал. - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1975. - 189 с.
- Вотинцев К. К., Мешерякова А. И., Ходжер Т. В. Поступление биогенных элементов и органического вещества в оз. Байкал с речным стоком и атмосферными осадками // Антропогенное эвтрофирование природных вод. - Черноголовка, 1983. - С. 187-188.
- Вотинцев К. К., Мизандронцев И. Б. О проекте стандарта показателей качества вод озера Байкал // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. - Иркутск, 1981. - Вып. 5: Гидрохимия и донные отложения. - С. 26-28.
- Вотинцев К. К., Тарасова Е. Н., Мешерякова А. И., Верболова Н. В. Современное состояние гидрохимического режима озера Байкал и его притоков // Региональный мониторинг состояния оз. Байкал. - Л.: Гидрометеоиздат, 1987. - С. 111-120.
- Вотинцев К. К., Ходжер Т. В. Химический состав атмосферных осадков в районе Байкала // География и природные ресурсы. - 1981. - № 4. - С. 100-105.
- Галазий Г. И., Вотинцев К. К. О научных основах разработки предельно допустимых концентраций веществ в промышленных стоках с позиций лимнологии // Водные ресурсы. - 1973. - № 4. - С. 140-144.
- Галазий Г. И., Тарасова Е. Н. Динамика биогенных элементов как показатель современного состояния экосистемы оз. Байкал // История озер. Рациональное использование и охрана озерных водоемов. - Минск, 1989. - С. 158-159.
- Галазий Г. И., Тарасова Е. Н., Голобокова Л. П., Лобаева Л. А. О корреляционной зависимости хлорофилла "а" и биогенных элементов в водах Байкала // 100-летие исследований полейков в Восточной Сибири и на Байкале: Тез. докл. советско-польского симпозиума. - Иркутск, 1989. - С. 26-28.
- Гершанович Д. Е., Елизаров А. А., Саложников В. Д. Биопродуктивность океана. - М.: Агропромиздат, 1990. - 236 с.
- Глазунов И. В. Гидрохимический режим и химический сток реки Ангары в ее истоке // Тр. ЛИН СО АН СССР. - 1963. - Т. 3(23). - С. 57-94.
- Гутельмахер В. Л. Метаболизм планктона как единого целого. - Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1986. - 155 с.
- Жукова Т. В. Роль биогенных веществ в биотическом круговороте и эвтро-

- фировании Нарочанских озер: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. - Киев, 1987. - 23 с.
- Йоргенсен С. Э. Управление озерными системами. - М.: Агропромиздат, 1985. - 160 с.
- Кожова О. М. О стоке фитопланктона из Байкала в Ангару // Конференция молодых научных сотрудников. - Благовещенск, 1980. - Вып. 2: Биология. - С. 12-13.
- Коряков Е. А. Первые данные по биостоку из озера Байкал // Изв. Вост. фил. АН СССР. - 1957. - № 7. - С. 48-53.
- Кудрявцев В. М. О способности бактерий к минерализации органического вещества водорослей // Гидробиол. журн. - 1972. - Т. 8. - С. 67-71.
- Лаврович-Гранина Л. З. К вопросу о круговороте железа и марганца в Байкале // Водные ресурсы. - 1987. - № 3. - С. 67-72.
- Ли М. Е., Нейумин П. Г., Шерстянкин П. П. Некоторые черты динамики вод Байкала по материалам гидрооптических наблюдений // Тр. ЛИН СО АН СССР. - 1970. - Т. 14(34). - С. 134-145.
- Меньковский В. И. Некоторые данные о динамике слива воды из Байкала в Ангару в зимний период // Там же. - 1964. - Т. 5(25). - С. 22-28.
- Мартынова М. В. Азот и фосфор в донных отложениях озер и водохранилищ. - М.: Наука, 1984. - 160 с.
- Методы определения продукции водных животных / Под ред. Г. Г. Винберга. - Минск, 1968. - 245 с.
- Мизандронцев И. Б. Химические процессы в донных отложениях. - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. - 173 с.
- Митрошков А. В., Кирюхин В. П., Рахманова Т. В. Хромато-масс-спектрометрический и газохроматографический методы определения полихлорированных бифенилов в окружающей среде // Тр. ИЭМ. - 1990. - Вып. 17(145). - С. 128-139.
- Неринг Д., Вильде А., Роде К. Х. Исследование атмосферного привноса биогенных веществ в Балтийское море // Обмен химическими элементами на границах раздела морской среды. - М., 1981. - С. 8-12.
- Половская Г. И. Годовые изменения фитопланктона // Тр. ЛИН СО АН СССР. - 1971. - Т. 12(32). - С. 158-169.
- Половская Г. И. Современное состояние и прогноз развития фитопланктона Байкала // V съезд Всесоюз. гидробиол. о-ва: Тез. докл. - Кузбасс, 1986. - С. 201-208.
- Россолимо Л. Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. - М.: Наука, 1977. - 144 с.
- Свейн В. Р. Контроль загрязнения североамериканских Великих озер // Водные ресурсы. - 1985. - № 3. - С. 139-147.
- Секи Хумитаке. Органические вещества в водных экосистемах. - Л.: Гидрометеоиздат, 1986. - 199 с.
- Скопинцев Б. А. О скоростях регенерации биогенных элементов (N и P) при бактериальном разложении планктонных организмов // Микробиология. - 1938. - Т. 7, № 6. - С. 756-765.
- Скопинцев Б. А. Об изменении содержания азота и фосфора в терригенных взвешенных частицах в водной среде // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. - 1948. - Т. 12, № 2. - С. 108-117.
- Скопинцев Б. А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус) // Тр. ГОИН. - 1950. - Т. 17(29). - 290 с.

- Скопинцев Б. А. Расчет образования и окисления органического вещества в морских водах // Океанологические исследования. - 1965. - Вып. 13. - С. 96-107.
- Скопинцев Б. А. Закономерности разложения (минерализации) органического вещества отмирающего планктона // Водные ресурсы. - 1976. - № 2. - С. 150-160.
- Скопинцев Б. А., Брук Е. С. Исследование окислительных процессов, протекающих в воде при разложении фитопланктона в аэробных условиях // Микробиология. - 1940. - Т. 9, № 6. - С. 595-607.
- Скопинцев Б. А., Ларнонов Ю. В. Органическое вещество во взвесах некоторых озер разной степени трофии // Там же. - 1979. - № 5. - С. 159-170.
- Современное состояние экосистемы Ладожского озера. - Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1987. - 213 с.
- Сойфер В. Н., Брезгунов В. С., Верболов В. И. и др. Применение изотопного метода при изучении водообмена оз. Байкал // Течения и диффузия вод Байкала. - М.; Л.: Наука, 1970. - С. 146-152.
- Сокольников В. М. Течения и водообмен в Байкале // Элементы гидрометеорологического режима оз. Байкал. - М.; Л.: Наука, 1964. - С. 99-130.
- Тарасова Е. Н. О содержании органического вещества в sestone Байкала // Лимнология придельтовых пространств Байкала. - Л.: Наука Ленингр. отд-ние, 1971. - С. 81-85. - (Тр. ЛИН СО АН СССР; Т. 12(32)).
- Тарасова Е. Н. О соотношении органических и минеральных компонентов взвеси вод Южного Байкала // Гидробиол. журн. - 1972а. - Т. 8, № 1. - С. 17-25.
- Тарасова Е. Н. О соотношении органического углерода с различными видами окисляемости в водах открытого Байкала // Там же. - 1972б. - Т. 8, № 5. - С. 70-75.
- Тарасова Е. Н. О сравнении скорости распада органического вещества водоема и сточных вод сульфат-целлюлозного производства // XXV Всесоюз. гидрохимическое совещание: Тез. докл. - Новочеркасск, 1972в. - С. 263-265.
- Тарасова Е. Н. Органическое вещество вод Южного Байкала. - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1975. - 147 с.
- Тарасова Е. Н. Суточные изменения элементарного состава органического вещества и биогенных элементов вод Южного Байкала // Круговорот веществ и энергии в водоемах. Гидрохимия и качество вод. - Липовичное-на-Байкале, 1977. - С. 81-85.
- Тарасова Е. Н. Содержание валового органического вещества в водах Байкала в период массового развития *Synedra acus* // Докл. АН СССР. - 1979а. - Т. 246, № 5. - С. 1278-1280.
- Тарасова Е. Н. Степень окисленности органического вещества вод Байкала // III Всесоюз. симпозиум по изучению органического вещества и биогенных элементов во внутренних водоемах: Тез. докл. - Таллин, 1979б. - С. 43-49.
- Тарасова Е. Н. Закономерности разложения органического вещества байкальского фитопланктона // Проблемы экологии Прибайкалья. - Иркутск, 1982. - 20 с.
- Тарасова Е. Н. Органическое вещество в пелагиали оз. Байкал // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах. - Петрозаводск, 1983. - С. 96-97.
- Тарасова Е. Н. Взвешенное вещество в водах Байкала и его притоках //

VI Всесоюз. совещание лимнологов: Тез. докл. - Иркутск, 1985. - С. 135.

Тарасова Е. Н. Роль доминирующих форм фитопланктона в создании органического вещества в воде озера Байкал // V съезд Всесоюз. гидро-биологического общества: Тез. докл. - Кулбышев, 1986. - С. 213-216.

Тарасова Е. Н., Верболова Н. В. Поступление фосфора в оз. Байкал с речным стоком // Проблемы экологии Прибайкалья. - Иркутск, 1988. - С. 45.

Тарасова Е. Н., Верболова Н. В., Лобина Л. А. Содержание азота, хлорофилла "а", органического вещества и биогенных элементов в водах истока р. Ангары и Лиственничного залива // VI Всесоюз. совещание лимнологов: Тез. докл. - Иркутск, 1985. - С. 134.

Тарасова Е. Н., Вотинице К. К. Органическое вещество и биогенные элементы под притоком Байкала // Проблемы экологии Прибайкалья. - Иркутск, 1982. - Ч. 2. - С. 21.

Тарасова Е. Н., Вотинице К. К. Водная взвесь и органическое вещество в водах Байкала // X Всесоюз. симпозиум "Бiol. проблемы Севера": Тез. докл. - Магадан, 1983. - С. 288-290.

Тарасова Е. Н., Вотинице К. К. Взаимное органическое вещество и доля взвешенного органического углерода в водах Байкала // Взаимодействие между водой и седиментами в озерах и водохранилищах. - Л.: Наука, Ленингр. отделение, 1981. - С. 61-72.

Тарасова Е. Н., Вотинице К. К., Лобина Л. А. Биогенные элементы в водах главных притоков оз. Байкал // Биологические проблемы Севера. - Иркутск, 1986. - С. 114.

Тарасова Е. Н., Вотинице К. К., Мещерякова А. И. Поступление аллохтонного органического вещества в воды Байкала как элемент его баланса // V гидрологический съезд: Тез. докл. - Л., 1986. - С. 110-112.

Тарасова Е. Н., Галкин Л. М. О скорости распада органического вещества сточных вод сульфат-целлюлозного производства // XXVII Всесоюз. гидрохимическое совещание: Тез. докл. - Новочеркасск, 1980. - С. 98-99.

Тарасова Е. Н., Голобокова Л. П., Лобина Л. А. Исследование органического вещества в водах Байкала // V Всесоюз. конф. по аналитической химии органических соединений: Тез. докл. - М.: Наука, 1984. - С. 289-290.

Тарасова Е. Н., Голобокова Л. П., Верболова Н. В. и др. Взвешенные, минеральные и органические вещества в водах оз. Селенги // Состояние и перспективы развития методологических основ химического и биологического мониторинга поверхностных вод суши. - Ростов н/Д, 1987. - С. 88.

Тарасова Е. Н., Голобокова Л. П., Олесов Г. А. Нормативное распределение содержания сульфатов в водах глухожидких станций Южного Байкала // Проблемы экологии Прибайкалья. - Иркутск, 1988. - С. 103.

Тарасова Е. Н., Матвеев А. А., Шимараев М. Н. и др. Роль отдельных источников в поступлении химических веществ в оз. Байкал // Состояние и перспективы развития методологических основ химического и биологического мониторинга поверхностных вод суши. - Ростов н/Д, 1987. - С. 87.

Тарасова Е. Н., Мещерякова А. И., Ходжер Т. В. Органическое вещество в химическом балансе Байкала // Комплексные методы контроля качества природной среды. - Черногоровка, 1986. - С. 128.

Тарасова Е. Н., Парфенова В. В., Верболова Н. В. О степени распада органического вещества в сточных водах // Биологические проблемы Севера. - Магадан, 1986. - С. 115.

Тарасова Е. Н., Судакова Н. Д., Голобокова Л. П., Верболова Н. В. Сравнительная характеристика и влияние проточек и промывбросов Байкальского ЦБК на химический состав вод Байкала // Состояние и перспективы развития методологических основ химического и биологического мониторинга поверхностных вод суши. - Ростов н/Д, 1987. - С. 89.

Толмачев В. А. Некоторые гидрохимические показатели внутреннего водообмена в Байкале // Докл. АН СССР. - 1957. - Т. 113, № 3. - С. 1011-1013.

Форш Т. Б. К вопросу о химическом составе воды притоков озера Байкал // Тр. Байкал. лимнол. ст. АН СССР. - 1931. - Т. 1. - С. 1-8.

Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология. - Л.: Гидрометеоздат, 1987. - 335 с.

Химический состав атмосферных осадков на европейской территории СССР / Дроздова В. М., Петренко С. П., Селезнева Е. С. и др. - Л.: Гидрометеоздат, 1964. - 209 с.

Ходжер Т. В., Богданов В. Т. Поступление веществ с атмосферной пылью на поверхность Байкала // VI Всесоюз. лимнологическое совещание: Тез. докл. - Лиственничное-на-Байкале, 1985. - Вып. 7. - С. 91-92.

Ходжер Т. В., Тарасова Е. Н., Андрухова В. Я. Органическое вещество и биогенные элементы в атмосферных осадках и задачи дальнейших исследований // Региональный мониторинг состояния озера Байкал. - Л., 1987. - С. 71-79.

Экологическая система Нарочанских озер. - Минск: Изд-во Университетское, 1985. - 302 с.

Adams W. P., English M. C., Lauenby D. C. Snow and ice in the phosphorus budget of a lake in South Central Ontario // Water Res. - 1979. - Vol. 13, N 2. - P. 213-215.

Beeton A. M., Edmondson W. T. The eutrophication problem // Fish. Res. Board. Canada. - 1972. - Vol. 29, N 6. - P. 573-682.

Bartsch A. P. Accelerated eutrophication of lakes in the United States ecological response to human activities // Environ. Pollut. - 1970. - Vol. 1, N 2. - P. 16-21.

Brandt Th., Rakestraw N., Rein Ch. Experimental decomposition and regeneration of nitrogenous organic matter in sea water // Biological Bull. - 1937. - Vol. 72, N 2. - P. 165-174.

Burns N. M. Nutrient budgets for lake Erie, 1970 // Fish. Res. Board, Canada. - 1976. - Vol. 33, N 3. - P. 520-536.

Carpenter E. J., Capone D. C. Nitrogen in the marine environment. - N. Y.: Academic, 1983. - 150 p.

Cooper L. The rate of liberation of phosphate in sea water by the breakdown of plankton organisms // Marine Biol. Assoc. - 1935. - Vol. 20. - P. 197-209.

Degens E. T., Reuter J. H., Shaw N. F. Biochemical compounds in off shore California sediments and sea waters // Geochem. Cosmochim. Acta. - 1964. - N 28. - P. 45-52.

- Dillon P.I. The phosphorus budget of Cameron Lake, Ontario: the importance of flushing rate to the degree of eutrophy of lakes // *Limnol. Oceanogr.* - 1975. - Vol. 20. - P. 28-39.
- Duce R.A. The impact of atmospheric nitrogen, phosphorus and non species on marine biological productivity // *The Role of Air - Sea Exchange in Geochemical Cycling.* - N.Y., 1986. - P. 110-121.
- Durisma E.K. Dissolved organic carbon, Nitrogen and phosphorus in the sea // *Neth. J. Sea Res.* - 1961. - Vol. 1, N 1. - P. 10-15.
- Goldman C.R., Carter R.C. An investigation by rapid carbon-14 bioassay of factors affecting the cultural eutrophication of Lake Tahoe, California - Nevada // *Water Poll. Control Federation.* - 1967. - Vol. 37. - P. 1040-1059.
- Colterman H.L. Methods for chemical analysis of fresh waters // *IBP. Handbook.* - 1969. - N 8. - P. 114-121.
- Hartmann L., Wilderer P. Physical and biochemical aspects of BOD kinetics // *Water Res.* - 1968. - Vol. 2, N 1. - P. 30-37.
- Healey F.P. Inorganic nutrient uptake and deficiency in algae // *Brit. Rev. Microbiol.* - 1973. - Vol. 3. - P. 69-113.
- Healey F.P., Hendzel L.L. Physiological indicators of nutrient deficiency in lake phytoplankton // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* - 1980. - Vol. 37. - P. 442-453.
- Hecky R.E., Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effect of enrichment // *Limnol. Oceanogr.* - 1988. - Vol. 33, N 4. - P. 796-823.
- Jackson T.A. Humic matter in natural waters and sediment // *Soil. Sci.* - 1975. - N 56. - P. 117-124.
- Kitchner W.B., Dillon P.I. An empirical method of estimating the retention of phosphorus in lakes // *Water Resour. Res.* - 1977. - Vol. 11, N 1. - P. 182-183.
- LaRow E.J. Secondary production of predatory zooplankton // *US IBP EDFB Memo report.* - 1981. - 44 p.
- Mathematical models of water quality in large lakes. I. Lake Huron and Saginaw Bay // *Environ. Res. Lab. Minn. Yuly. EPA-600 / 3-80-056.* - 1980. - P. 155.
- Olson F.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems // *Ecology.* - 1963. - Vol. 44. - P. 322-329.
- Ostrovsky M.L. Modification of phosphorus retention models for use with lakes with low water loading // *Intern. Fish. Res. Board. Canada.* - 1978. - Vol. 35, N 12. - P. 1532-1535.
- Peters R.H. Phosphorus regeneration by natural populations of limnetic zooplankton // *Verh. Int. Ver. Limnol.* - 1975. - Vol. 19, N 1. - P. 273-278.
- Peters R.H., Rigler F.H. Phosphorus release by *Daphnia* // *Limnol. Oceanogr.* - 1973. - Vol. 18, N 6. - P. 821-839.
- Redfield A.C. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton // *James Johnstone Memorial Volume.* - Liverpool: Univ., 1934. - P. 176-192.
- Redfield A.C., Ketchum B.H., Richards F.A. The influence of organisms on the composition of sea-water // *The Seaw. Ed. M.N. Hill.* - N.Y.; Z., 1963. - Vol. 4, 2. - P. 26-77.
- Ryther J.H., Officer C.D. Impact of nutrient enrichment on water uses // *Estuaries and nutrients / Ed. B.J. Neilson, L.E. Cronin.* - Humana, 1981. - P. 247-262.
- Simons T.J., Lam D.C.L. Some limitations of water quality models for large lakes: a case study of Lake Ontario // *Water Resour. Res.* - 1980. - P. 105-116.
- Singer T.F. Eutrophication in lakes. // *Verh. Int. Ver. Limnol.* - 1969. - Vol. 17. - P. 529-531.
- Sommer U. Nutrient competition between phytoplankton species in multispecies chemostat experiments // *Arch. Hydrobiol.* - 1983. - Vol. 96. - P. 399-416.
- Tilman D. Resource competition between planktonic algae. An experimental and theoretical approach // *Ecology.* - 1977. - Vol. 58. - P. 338-348.
- Tomas N.A., Robertson A., Sonzogni W.C. Review of control objectives, new target loads and input controls // *Phosphorus management strategies for lakes / Ed. Lochr. R.C., Martin C.S., Rast W.* - Michigan: Publishers, 1980. - P. 61-90.
- Uhlmann Dietrich. Evaluation of strategies for Controlling Eutrophication of lakes and Reservoirs // *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie.* - 1982. - Vol. 67, N 6. - P. 821-837.
- Varma M.M., Digiano R. Kinetics of oxygen uptake by dead algal // *J. Water. Poll. Control. Fed.* - 1968. - Vol. 40, N 4. - P. 30-38.
- Vollenweider R.A. The scientific basis of lake and stream eutrophication with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors // *Techn. Rept. OE CD DAS / DS 3168.* - Paris, 1968. - N 27. - 159 p.
- Vollenweider R.A., Dillon P.I. The application of the phosphorus loading concept for eutrophication research // *Nat. Res. Counc (Canada).* - 1974. - N 13690.
- Vollenweider R.A., Rast W., Kercker I. The phosphorus loading concept and great Lake eutrophication // *Phosphorus management strategies for lakes. Ann. Arbor.* - 1980. - P. 207-234.
- Zobell C.E. *Marine Microbiology - Chronica Botanica.* Watham. Mass. - 1946. - 240 p.