

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

УДК 504.4.054

ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРНЫХ ОЗЕР¹

© 2012 г. Т. И. Моисеенко, Л. В. Разумовский*, Н. А. Гашкина, А. В. Шевченко**,
В. Л. Разумовский*, А. С. Машуков**, В. Ю. Хорошавин***

Институт геохимии и аналитической химии РАН

119991 Москва, ул. Косыгина, 19

**Институт водных проблем РАН*

119333 Москва, ул. Губкина, 3

E-mail: razum@aqu.laser.ru

***Кабардино-Балкарский государственный университет*

360004 Нальчик, ул. Чернышевского, 173

****Тюменский Государственный Университет*

625003 Тюмень, ул. Семакова 10

Поступила в редакцию 27.07.2010 г.

Приведены результаты исследования четырех горных озер, расположенных в различных климатических зонах — регионах Кольского Севера и Западного Кавказа. На основе разработанных оригинальных методов палеоэкологической реконструкции дается характеристика основных тенденций и темпов изменения окружающей среды в историческом срезе (по геохимическому составу и диатомовым комплексам в слоях донных отложений). Для исследованных озер в различных природно-климатических зонах определены сходные процессы обогащения вод металлами в современный период, в особенности Cd и Pb. Для озер Кольского Севера установлены тенденции изменения кислотно-щелочного баланса начиная с конца XIX в., свидетельствующие о влиянии трансграничного переноса кислотообразующих веществ из индустриальной Европы. На основе исследования диатомовых комплексов озер Кавказа установлено повышение среднегодовой температуры озерных вод предположительно на 1.5°C за XX в.

Ключевые слова: качество вод, трансграничный перенос, атмосферные выпадения, диатомовый анализ, палеоэкологические реконструкции.

Горные озера наилучшим образом отражают загрязнение верхних слоев атмосферы и глобальное обогащение хемосферы токсичными элементами и веществами по следующим причинам:

— формирование качества вод происходит преимущественно за счет атмосферных выпадений, с которыми поступают загрязняющие вещества (**ЗВ**): сульфаты, нитраты, тяжелые металлы (**ТМ**), органические ксенобиотики и другие;

— преобразование атмосферных выпадений на водосборе практически не наблюдается из-за слабого развития или отсутствия почвенно-растительного покрова;

— низкие температуры вод, их ультрапресный и олиготрофный характер обуславливают слабую самоочищающуюся способность водоемов;

— отсутствуют какие-либо другие прямые источники загрязнения на их водосборе (сельское

хозяйство, промышленные сточные воды), что позволяет оценить изменения химического состава вод под воздействием трансграничных переносов ЗВ в верхних слоях атмосферы.

Палеоэкологические исследования озер занимают ведущее место в ряде крупных международных программ: РЕР (полюс—экватор—полюс) для Европы и Африки, CAPE (циркумполярная окружающая среда в прошлом), MOLAR (изучение горных озер). Многие отдаленные от промышленных центров горные озера Европы — в Шотландии, Южной Норвегии, а также в Альпийских, Пиринейских горах и Татрах закислены, загрязнены ТМ, пестицидами и другими веществами вследствие трансграничных переносов загрязненных воздушных масс из индустриально развитых центров [14, 21, 28, 29]. В последние годы особое внимание уделяется палеоэкологическому методу исследования донных отложений (**ДО**) озер, основанному на совместном анализе геохимического состава ДО и видового состава диатомовых комплексов с учетом их экологической приуроченности.

¹ Работа выполнена в рамках ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (проект П176), при поддержке Правительства РФ (проект 11G34.31.0036), РФФИ (проект 10-05-00854).

Таблица 1. Общая характеристика исследованных горных озер

Показатель, размерность	Озера			
	в Чуна-тундре		Кардывач	
Широта	67°57'	67°41'	43°734.6	43°72'
Долгота	32°29'	33°37'	40°37.5'	40°17'
Высота над у.м., м	475.3	434.4	1785	1867
Площадь озера, га	12.5	3.5	13.3	10
Максимальная глубина, м	18	5.6	17.5	1.8
Средняя глубина, м	10	3.2	9.8	1.01
Объем воды, 10 ⁶ м ³	1.25	0.11	1.31	0.1
Период водообмена, год	1	0.03	—	—
Период открытой воды, мес.	6	6	5	4
Площадь водосбора, км ²	2.05	5.25	—	—
Среднегодовое выпадение	900	850	—	—
Выпадение <i>S</i> на водосбор, г S/м ²	0.4	0.6	—	—

Характерная черта строения диатомей — наличие кремниевого панциря, имеющего сложную структуру и хорошо сохраняющегося в ископаемом состоянии. Поэтому по их составу в ДО можно дать ретроспективную оценку состояния экосистем и окружающей среды в прошлом, выявить динамику развития неблагоприятных процессов. По сравнению со временем формирования позднечетвертичных отложений темпы внутривидовой эволюции в этой группе водорослей невелики. Видовой состав пресноводных диатомовых комплексов за последние 10–20 тыс. лет фактически не изменился. Поэтому диатомовые водоросли — одна из руководящих индикационных групп при восстановлении экологических палеообстановок пресноводных водоемов. По их видовому составу в ДО можно реконструировать в историческом интервале внешние воздействия и экологическое состояние водоема, в частности, реконструировать изменения рН, сапробности и температурных условий.

Цель работы — выявить влияние воздушного загрязнения на показатели химического состава вод горных озер; в исторической ретроспективе оценить влияние обогащения хемосферы металлами, в особенности кадмием и свинцом; развитие закисления и/или эвтрофирования (повышения сапробности); выделить температурные циклы по динамике видового состава и экологических групп диатомовой флоры.

Исследования выполнены на примере двух озер Кольского Севера, расположенных в Хибинских горах и Чуна-тундре, и двух озер Кавказского горного массива в районе Красной Поляны.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕР И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованные озера различаются по своим морфометрическим характеристикам (табл. 1). Оз. Сердцевидное расположено в Хибинских горах на высоте 434.4 м над у. м., имеет максимальную глубину 5.6 м; озеро в Чуна-тундре (без названия) — на высоте 475.3 м и глубиной 18 м. Эти небольшие озера резко различаются по условиям формирования химического состава вод (первое устойчиво к кислотным нагрузкам, другое уязвимо). Два озера в Кавказских горах расположены в районе Красной Поляны: Хмелевское — на высоте 1876 м над у. м., его глубина весной 7–8 м, в летнюю межень 1.8 м; Кардывач — на высоте 1785 м над у. м., глубина 17.5 м.

Кольский Север расположен на пути трансграничного переноса воздушных масс из Европы в Арктику. Его центральная часть представлена Хибинскими и Ловозерскими горными массивами, а также высокогорной тундрой: Чуна, Волчья и Сальная. Хибины (максимальная высота гор — 1190 м над у. м.) широко известны своими фосфорсодержащими породами (апатито-нефелиновыми сиенитами). Они характеризуются калиевыми, натриевыми и алюминиевыми геохимическими ассоциациями, что определяет высокую буферную емкость водосборов горных озер по отношению к кислотным выпадениям.

Возвышенности Чуна-тундры (до 1114 м над у.м.), в отличие от Хибин, сложены габбро- и гранито-гнейсовыми формациями. Вследствие низкого содержания труднорастворимых щелочных элементов (Са и Mg) эти породы обладают низкой способностью к нейтрализации кислых выпадений. Между двумя массивами находится крупный металлургический комбинат “Северони-

кель”, выбросы ЗВ которого могут в той или иной степени обуславливать нагрузку кислотообразующих веществ и ТМ на горные озера. Результаты анализа проб снежного покрова на водосборах озер позволили доказать, что сильно загрязненные региональными выбросами воздушные массы не поднимаются на высокогорные участки. Выпадение серы (S) здесь низкое и соответствует современному региональному уровню для севера Фенноскандии ($0.4 - 0.6 \text{ г S/m}^2$); на водосборах озер у подножия гор ($\approx 200 \text{ м над у. м.}$) составляет $1.0 - 1.5 \text{ г S/m}^2$ [20].

Кавказские горы в районе Красной Поляны сложены гранитами, что определяет их уязвимость к кислотным нагрузкам. Оз. Хмелевское не имеет стока, и его питание происходит только за счет атмосферных выпадений. Поэтому, несмотря на небольшую глубину, это озеро интересно как аккумулятор всех выпадений из атмосферы. Весной уровень озера значительно повышается. Кавказские озера находятся на значительном удалении от каких-либо региональных антропогенных воздействий, их воды и ДО отражают загрязнения верхних слоев атмосферы, если таковые имеются, а также трансграничные переносы веществ на дальние расстояния. Оз. Хмелевское бессточное, поэтому может рассматриваться как естественный улавливатель всех атмосферных выпадений. Оз. Кардывач — проточное и более глубоководное.

Исследовательская программа включала в себя отбор проб воды и колонок ДО на химический состав и диатомовый анализ. Пробы воды в озере из Чуна-тундры отобраны в подледный период (март—апрель), в период максимума вегетации (июль—август) и осенью (сентябрь—октябрь); в оз. Сердцевидном — в лето и осенью (1998 г.). В озерах Кавказских гор пробы воды и ДО отобраны в сентябре 2004 и 2006 гг. Аналитическая программа проб воды включала в себя определение по стандартным методикам [12, 28] следующих элементов: pH, электропроводность, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , $\text{P}_{\text{общ}}$, HCO_3^- , перманганатная окисляемость. Кроме этого, методом атомной абсорбции с беспламенной атомизацией (Perken-Elmer 5000) определялось общее содержание ряда металлов (Ni, Sr, Cu, Co, Zn, Cr, Mn, Fe, Al, Pb, Cd, Hg) и их ионных лабильных форм. Корректность результатов подтверждена международной итеркалибрацией между европейскими лабораториями в рамках проекта MOLAR и ICP-Water [13, 21].

Пробы ДО в озерах отобраны на максимальной глубине (в зоне аккумуляции). Для отбора использовалась трубка гравитационного типа с автоматически закрывающейся диафрагмой [26]. Длина колонок ДО, отобранных из озер, составила в Чуна-тундре — 18, Сердцевидном — 14, Кардывач — 17 и Хмелевском — 40 см. Колонки ДО были разрезаны

на отдельные образцы с интервалом в 1 см. В них определялось: содержание влаги, потери при прокаливании — как косвенный показатель содержания органических веществ (ОВ), концентрации: Ni, Sr, Cu, Co, K, Ca, Mg, Na, Zn, Mn, Fe, Al, Pb, Cd методом атомной абсорбции. Содержание элементов в наиболее глубоких горизонтах толщи ДО (более 10 см от поверхности) принято за фоновое значение.

Отбор проб для диатомового анализа осуществлялся по всему разрезу отобранных колонок ДО с интервалом в 1 см. Обработка проб, изготовление и просмотр постоянных препаратов осуществлялись по стандартным методикам [2, 3]. Классификация диатомовых водорослей по их экологической приуроченности проводилась согласно сводке по [1].

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОД

Общая черта химического состава вод исследуемых озер — их низкая минерализация и крайне низкое содержание биогенных элементов. Все обследованные озера — ультрапресные и олиготрофные водоемы. Содержание биогенных элементов (N и P) и ОВ в их водах соответствует таковому в арктических и альпийских озерах [21]. Вода в озере Чуна-тундра имеет слабокислую реакцию (pH 6.24–6.72), в оз. Хмелевском — кислую (pH 5.2–5.6), Кардывач — близкую к нейтральной (pH — 7.2) (среди катионов преобладает Ca). Вода оз. Сердцевидного характеризуется слабощелочной реакцией (pH 7.15–7.46), среди катионов преобладает Na. Значительно более высокой щелочностью обусловлена хорошая кислотонейтрализующая способность вод (табл. 2).

Содержание SO_4 ($< 80 \text{ мкэкв/л}$) в озерах Кольского Севера соответствует современному средне-региональному уровню такового для поверхностных вод региона, однако оно выше природных фоновых значений, которые в Фенноскандии составляют $15 - 20 \text{ мкэкв/л}$. Сильно загрязненные выбросами комбината “Североникель” воздушные массы оказывают гораздо меньшее влияние на высокогорные районы по сравнению с нижележащими. Концентрация SO_4 в воде озер у подножий гор, расположенных вблизи комбината “Североникель”, достигает $150 - 250 \text{ мкэкв/л}$. Концентрации SO_4 аналогичные таковым в воде горных озер, встречаются уже на удалении $> 100 \text{ км}$ от промышленных центров [20].

В воде горных озер Кольского Севера содержание Ni и Cu (маркеров выбросов от местных источников) соответствует среднерегиональным значениям для отдаленных озер ($0.5 - 1.4 \text{ мкг/л}$). Установлено, что 70% Ni содержится в ионной форме (табл. 2). Для оз. Сердцевидного выявлены аномально высокие концентрации ионных, наиболее

Таблица 2. Гидрохимические характеристики горных озер Кольского Севера (1993, 1994 гг.) и Западного Кавказа (2006 г.), (числитель и знаменатель – суммарное содержание и ионная форма соответственно, прочерк – отсутствие данных)

Показатель, размерность	Озера							
	Сердцевидное			б/н в Чуна-тундре			Хмелевское	Кардывач
	Кольский п-ов						Кавказские горы	
	среднее	min	max	среднее	min	max	значение	значение
pH	7.3	7.15	7.16	6.47	6.24	6.72	5.38	7.13
æ, мкСим/см	33	32	35	16	10	25	7	41
Цв., °Pt	2	0	3	5	0	9	5	<5
XПК _{Мп} , мг О/л	0.45	0.15	0.98	4.8	0.05	2.5	2.6	1.1
НСО ₃ ⁻ , мкЭкв/л	234	22.6	251	40	23	62	6	384
N _{общ} , мкг/л	154	140	167	550	287	1091	205	96
(NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻), мкг/л	140	7.9	215	83	17	162	2	68
NH ₄ ⁻ , мкг/л	76	3	14	22	2	45	34	1
P _{общ} , мкг/л	2.5	0	8	10	3	16	2	1
PO ₄ ³⁻ , мкг/л	2.5	1.95	5	2	0	3	0	0
Si ⁴⁺ , мг/л	0.47	0.33	3.13	1.5	0.88	2.36	0.14	1.18
Ca ²⁺ , мг/л	0.06	0.06	0.68	1.3	0.85	2.0	0.20	7.41
Mg ²⁺ , мг/л	5.8	5.6	0.07	0.22	0.14	0.34	0.05	0.52
Na ⁺ , мг/л	1.4	1.2	3.2	0.78	0.49	1.2	0.30	0.52
K ⁺ , мг/л	2.9	2.7	3.1	0.16	0.04	0.30	0.48	0.09
SO ₄ ²⁻ , мг/л	0.85	0.80		2.3	1.7	3.2	0.70	2.98
Cl ⁻ , мг/л	0.85	0.80	0.90	1.3	0.6	1.5	0.46	0.09
Sr, мкг/л	$\frac{60}{31}$	$\frac{55}{53}$	$\frac{62}{58}$	$\frac{6.8}{5.8}$	$\frac{5.2}{4.5}$	$\frac{8.5}{7.0}$	$\frac{1.6}{-}$	$\frac{10}{-}$
Al, мкг/л	$\frac{60}{31}$	$\frac{47}{25}$	$\frac{77}{40}$	$\frac{15.3}{2.0}$	$\frac{7.0}{1.0}$	$\frac{41}{2.5}$	$\frac{49}{-}$	$\frac{10}{-}$
Ni, мкг/л	$\frac{0.80}{0.65}$	$\frac{0.5}{0.6}$	$\frac{1.1}{0.7}$	$\frac{1.1}{0.8}$	$\frac{0.8}{0.5}$	$\frac{1.4}{1.1}$	$\frac{1.0}{-}$	$\frac{0.6}{-}$
Cu, мкг/л	$\frac{0.23}{-}$	$\frac{0.2}{-}$	$\frac{0.3}{-}$	$\frac{1.3}{0.4}$	$\frac{0.6}{0.1}$	$\frac{2.6}{0.8}$	$\frac{1.1}{-}$	$\frac{0.2}{-}$
Fe, мкг/л	$\frac{3.40}{0.13}$	$\frac{1.1}{0.1}$	$\frac{6.0}{0.2}$	$\frac{6.1}{0.3}$	$\frac{4.2}{0.1}$	$\frac{7.0}{0.5}$	$\frac{118}{-}$	$\frac{75}{-}$
Zn, мкг/л	$\frac{1.1}{-}$	$\frac{0.6}{-}$	$\frac{1.7}{-}$	$\frac{9.4}{-}$	$\frac{1.0}{-}$	$\frac{25}{-}$	$\frac{2.9}{-}$	$\frac{2.1}{-}$
Cd, мкг/л	$\frac{<0.1}{-}$	-	-	$\frac{0.13}{-}$	-	-	$\frac{0.13}{-}$	$\frac{<0.05}{-}$
Pb, мкг/л	$\frac{<0.5}{-}$	-	-	$\frac{0.5}{-}$	-	-	$\frac{<0.03}{-}$	$\frac{<0.03}{-}$
Mn, мкг/л	-	-	-	-	-	-	$\frac{06.4}{-}$	$\frac{01.0}{-}$
Hg*, нг/л	$\frac{<2}{-}$	-	-	$\frac{4.5}{-}$	-	-	-	-

токсичных форм Al и Sr, входящих в состав апатито-нефелиновых сиенитов, слагающих Хибинские горы. Данные элементы легко высвобождаются из этих пород под воздействием кислых атмосферных осадков и поступают в воду. Широко известно, что негативные для биоты последствия закисления озер связаны с высокой токсичностью лабильных форм Al, концентрация которого резко увеличивается в кислой среде. Таким образом, более критическая ситуация с закислением вод просматривается для озера в Чуна-тундре, где породы содержат малоподвижные катионы. Вторичные эффекты кислых выпадений, связанные с химическим выветриванием из пород токсичных форм Al и Sr, могут оказывать отрицательное воздействие на биоту. В период снеготаяния как в Хибинах, так и в Чуна-тундре на ручьях зарегистрированы кратковременные резкие падения pH – до 4.7 и 4.2 (при $\text{HCO}_3 = 0$), способные вызвать “pH-шок” у живых организмов [5].

Химический состав вод исследованных горных озер Кавказа отличается кальциевой минерализацией, содержание сульфатов низкое. Воды оз. Кардывач имеют слабощелочную реакцию, оз. Хмелевского – кислую. Поскольку оз. Хмелевское представляет собой своеобразную ловушку для загрязнений, выпадающих с атмосферными осадками, то показатели pH в воде озера и в атмосферных выпадениях близки. В то же время наличие кремния указывает на химическое выветривание основных катионов, которые теоретически должны увеличивать буферную емкость вод, что не наблюдается. Содержание катионов очень низкое. Воды оз. Кардывач имеют более высокую минерализацию, что объясняется достаточно большим водосбором и влиянием притока подземных вод. Содержание металлов – выше фоновых значений для вод Кавказа по сравнению с обследованными ручьями и родниками, берущими начало из подземных вод, что указывает на поступление металлов с атмосферными осадками.

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЛОЕВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Последствия любого локального и глобального загрязнения воздуха кислотообразующими веществами и ТМ достаточно отчетливо отражается на химическом составе ДО. Кислотные выпадения приводят к разбалансированию природного потока катионов с водосбора, интенсифицируют процесс поступления лабильных форм элементов в водоемы, снижают содержание в поверхностных слоях щелочных и легкоподвижных элементов, выпадающих с осадками на территорию водосборов и аккумулирующихся в ДО [5, 16].

Для озер Кольского Севера в химическом составе ДО происходит снижение содержания щелочных элементов по направлению к поверхности. Особенно отчетливо в условиях кислотных нагрузок прослеживается высвобождение элементов Ca, Mg и Na из верхних слоев ДО оз. Сердцевидного (рис. 1). Наблюдается аналогичное распределение Sr и Al, что объясняет их повышенные концентрации в воде (рис. 2). Таким образом, в ДО озер, водосбор которых сложен чувствительными к химическому выветриванию породами, под влиянием кислых выпадений происходит снижение содержания щелочных и легкоподвижных элементов. В толще ДО озера в Чуна-тундре, водосбор которого сложен трудно выветриваемыми породами, столь явных изменений в содержании основных катионов не выявлено. Кроме этого, верхние 4–5 см слоя толщи ДО характеризуются аккумуляцией ТМ, прежде всего Ni, Cu, Co, Pb, Cd (рис. 3 и 4). Увеличение содержания Ni, Cu и Co связано с выбросами в атмосферу предприятия “Североникель”. Несмотря на достаточно низкие концентрации этих элементов в воде, длительный период их поступления на водосборы (с 1940-х гг.) привел к накоплению металлов в ДО горных озер. Так, содержание Ni и Cu в поверхностном слое превышает их фоновые значения в озере в Чуна-тундре в 7.5 и 2.5, а в оз. Сердцевидном в 4 и 2 раза.

Скорость осадконакопления для сходного типа озер на Кольском Севере составляет ≈ 1 мм/год [15]. Таким образом, аккумуляция металлов началась, очевидно, ≈ 50 лет назад. Увеличение содержания Pb (в озере в Чуна-тундре – в 4.6, оз. Сердцевидном – в 3.4 раза) можно связать с началом индустриального освоения Кольского Севера. Доказано, что с индустриальным развитием связано увеличение глобального загрязнения Pb атмосферы северных регионов [22]. Аналогичная закономерность характерна и для Cd.

На рис. 4 показано нарастание содержания Cd и Pb в ДО горных озер Кавказа и Кольского Севера, что свидетельствует об общих процессах обогащения окружающей среды этими металлами даже в отдаленных районах. Данные авторов подтверждают, что происходит глобальное обогащение окружающей среды ТМ особенно Pb и Cd. Тенденции выявлены в разных природно-климатических зонах – тундре и субтропиках. Как видно, высокогорные озера Кавказа, которые расположены очень далеко от индустриальных центров, накапливают в наибольшей степени по сравнению с другими регионами Pb и Cd вследствие загрязнения верхних слоев атмосферы.

РЕКОНСТРУКЦИЯ pH ОЗЕРНЫХ ВОД

Качественный и количественный состав пресноводных диатомовых комплексов тесно связан с химическим составом воды, поэтому диатомовые

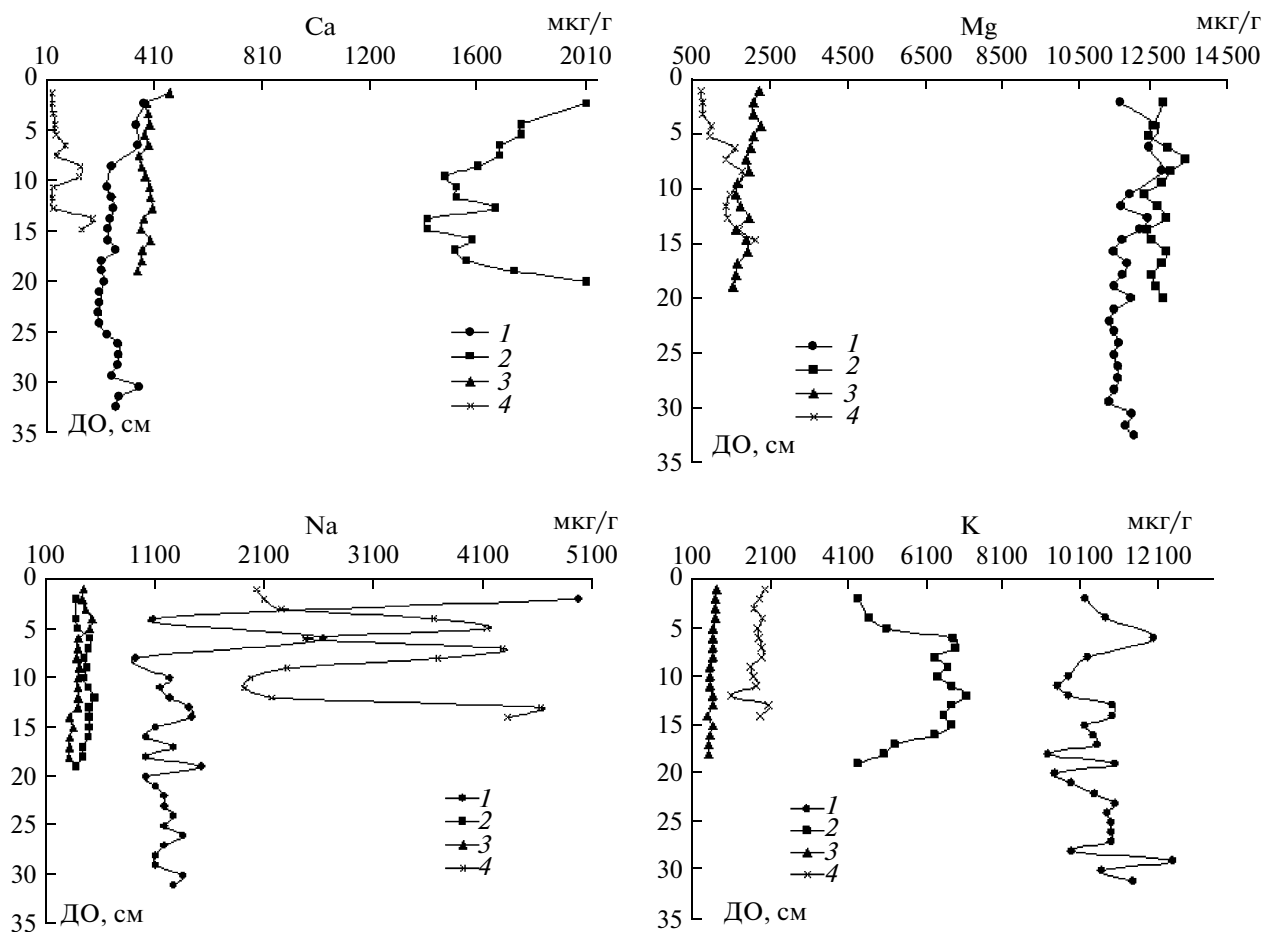


Рис. 1. Изменение концентраций металлов (Ca, Mg, Na, K) в разрезе ДО озер: 1 – Хмелевское; 2 – Кардывач; 3 – в Чуна-тундре; 4 – Сердцевидное.

признаны как биоиндикаторы, способные объективно отражать изменения окружающей среды, включая закисление вод. В [18] сделана одна из первых научно-значимых попыток разработки количественного подхода к использованию комплексов диатомовых водорослей в качестве индикаторов pH; авторами выделены следующие зоны оптимальных условий развития для пяти различных категорий диатомовых водорослей:

ацидобионтическая – оптимальное развитие при $pH < 5.6$;

ацидофильная (кислотная) – широкое (диффузное) распространение при $pH < 7$;

циркумнейтральная (малоизменчивая) – равномерное развитие при $pH \sim 7$;

алкалофильная (щелочная) – широкое (диффузное) распространение при $pH > 7$;

алкалобионтическая – оптимальное развитие только при $pH > 7$.

В [23] предложено учитывать пропорции процентного содержания створок диатомей на основе определения кислотных и щелочных единиц.

Под терминами “кислотные единицы” и “щелочные единицы” подразумевалось следующее: кислотные единицы = 5 (ацидобионтическая категория) + ацидофильная категория, %; щелочные единицы = 5 (алкалобионтическая категория) + алкалофильная категория, %.

На основе предложенной методики подсчета разработана группа индексов: α , ω и δ [23]. В [19] эти индексы усовершенствованы путем их логарифмирования (lg). Индекс α , рассчитываемый как отношение кислотных единиц к щелочным в процентах, – наилучший показатель pH для текущего прогноза в закисленных озерах [15, 17, 19].

В дальнейшем предложен новый индекс (B) [25], также основанный на использовании категорий диатомовых по отношению к pH. Индекс B имеет ряд преимуществ по сравнению с индексом α ввиду использования большего количества информации и меньшей зависимости от щелочных таксонов, которые обычно встречаются редко или отсутствуют в закисленных озерах.

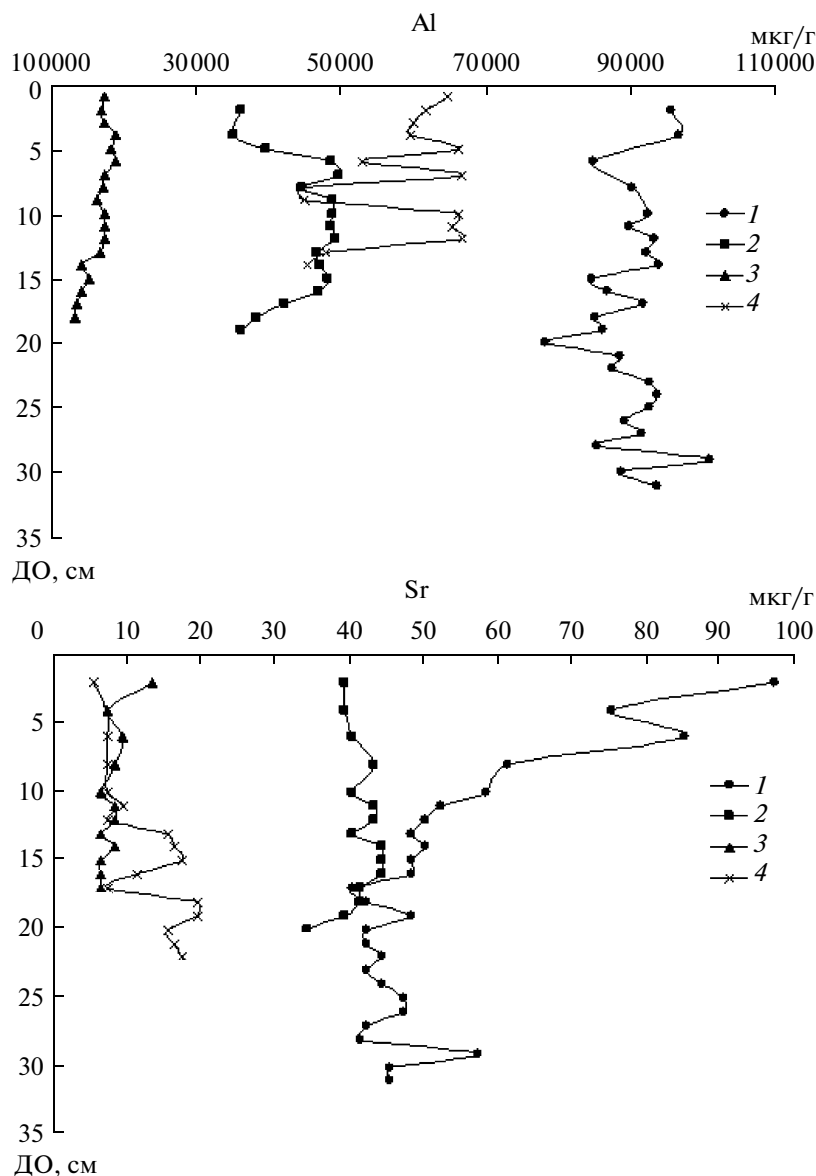


Рис. 2. Изменение концентраций металлов (Al, Sr) в разрезе ДО озер: 1 – Хмелевское; 2 – Кардывач; 3 – в Чуна-тундре; 4 – Сердцевидное.

Однако оба этих индекса обладают существенным недостатком – они оценивают или уровень рН уже закисленных озер, или темпы закисления [5]. Применительно к изучаемым объектам (озерам Хмелевскому и Кардывач) расчеты по индексам α и B очень проблематичны.

Предложен иной способ расчета численных значений рН в озерах [7]. В качестве образца взята методика расчета индекса сапробности (S) [27]:

$$S = \frac{\sum s_i k}{\sum k},$$

где s_i – индивидуальное численное значение для каждого таксона-индикатора; k – коэффициент

относительного обилия, рассчитанный по шестиступенчатой шкале [11]. Данный метод учитывает относительную частоту встречаемости гидробионтов (k) и их индикаторное значение s . Значение s определяется для каждого вида по спискам сапробных организмов, данным в [27] и в более поздних сводках [1].

При расчете уровня рН озерных вод применен аналогичный метод, что и при расчете индекса сапробности S ,

$$pH = \frac{\sum ph_i k}{\sum k},$$

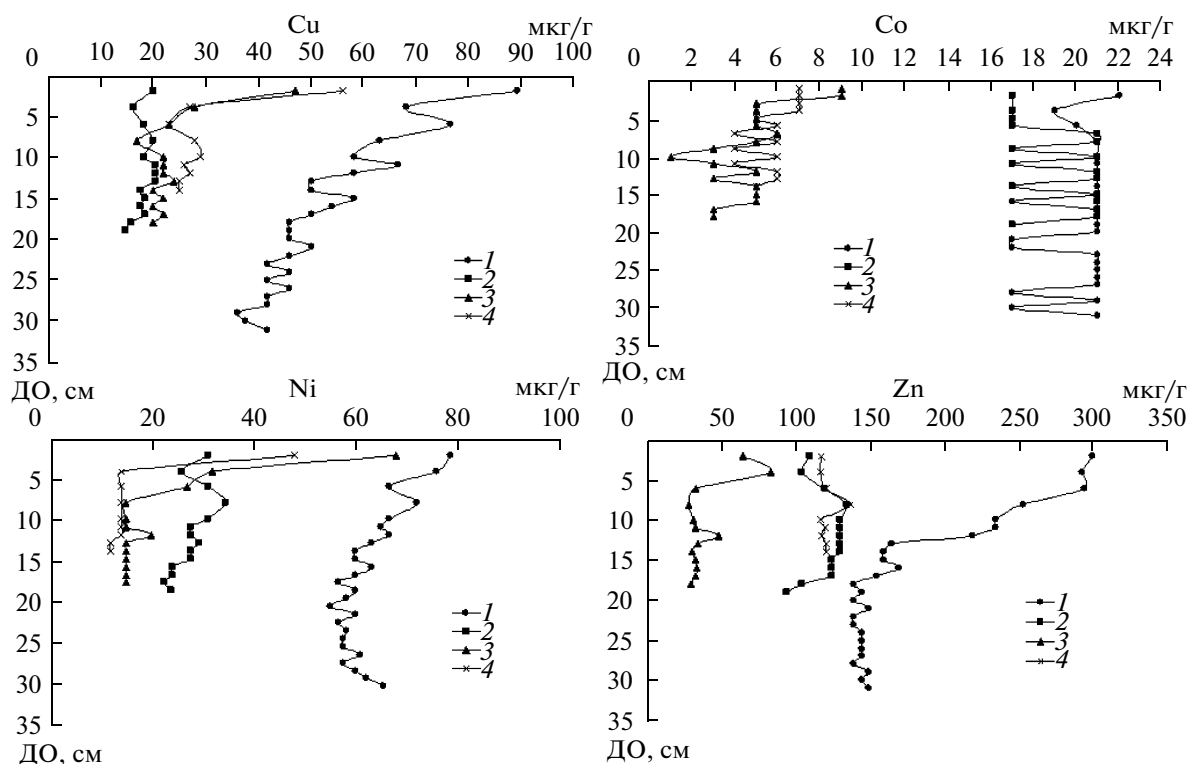


Рис. 3. Изменение концентраций металлов (Cu, Ni, Co, Zn) в разрезе донных отложений озер: 1 – Хмелевское, 2 – Кардывач, 3 – в Чуна-тундре, 4 – Сердцевидное.

где ph_i – индивидуальное численное значение для каждого таксона-индикатора; k – коэффициент относительного обилия, рассчитанный по шести-ступенчатой шкале [11].

Для получения более точных результатов и привлечения наиболее широкого спектра таксонов при реконструкции уровня рН в озере для каждой биоиндикационной группы проведены следующие расчетные операции [7]:

- при наличии данных, представленных в виде численного интервала, рассчитывалось его среднее значение;

- при отсутствии численных значений с указанием только принадлежности к одной из экологических групп расчет численного значения для данного таксона проводился путем расчета среднего значения для всех таксонов из той же экологической группы;

- для ацидофилов и ацидобионтов расчет численных значений проводился только в интервале от 0 до 7, а для алкалофилов и алкалобионтов – от 7 и выше. Если часть таксонов внутри интервала распространения выходила за эти границы, то при расчете среднего значения она не учитывалась как не соответствующая экологической характеристике данного таксона;

- всем индифферентным формам, не имеющим численных значений, присваивалось значение, равное 7.0.

Такой подход дает возможность существенно расширить спектр таксонов-индикаторов, имеющих численные значения. Исходной информационной базой данных для расчета численных значений параметров рН послужила коллективная монография, содержащая обобщающие сводки данных по индикационной приуроченности современных диатомовых водорослей [1]. Следует отметить, что при подобных реконструкциях наиболее значимый результат – детальное выявление темпов и направленности протекающих процессов, а не расчет численных значений как таковых.

Чтобы выяснить, насколько предложенный метод корректен и применим, проведено сравнение результатов расчета рН по новой методике и по индексу α для двух озер, расположенных на Кольском п-ове [5]. Расчет проводился по тому же первичному списку таксонов-индикаторов, что исключало любые разночтения. Динамики изменений численных значений рН по разрезам колонок ДО из озера в Чуна-тундре и оз. Сердцевидного оказались достаточно сходными (рис. 5). В результате применения двух различных методик получен достоверный интервал, определяющий динамику измене-

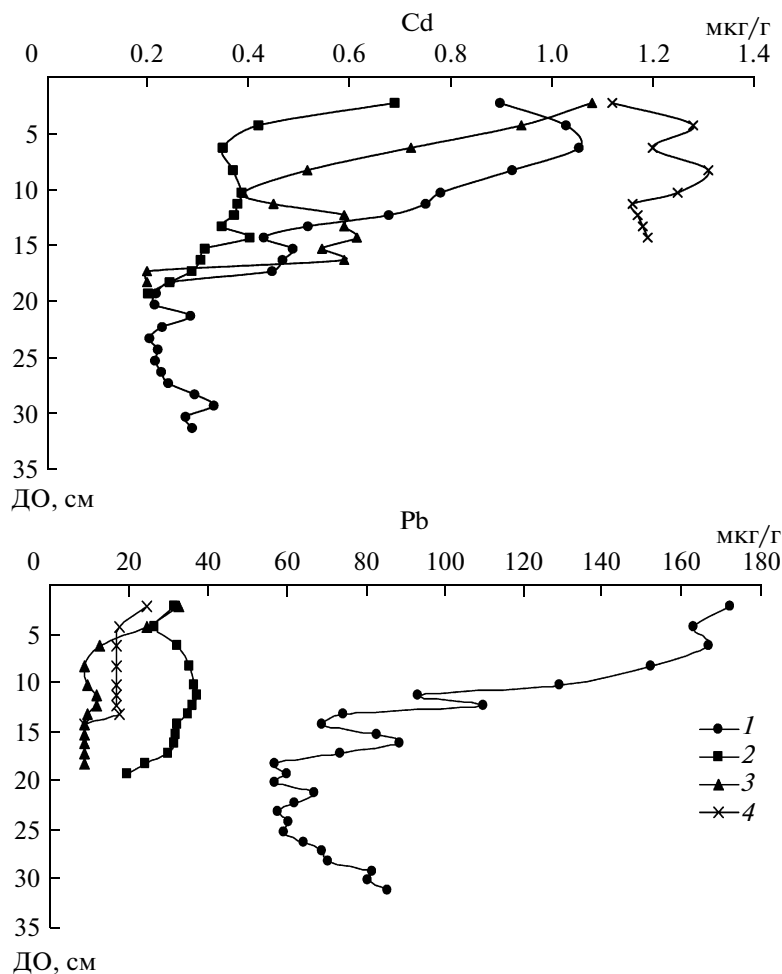


Рис. 4. Изменение концентраций металлов (Cd, Pb) в разрезе донных отложений озер: 1 – Хмелевское, 2 – Кардывач, 3 – в Чуна-тундре, 4 – Сердцевидное.

ния во времени уровня pH в этих озерах и показывающий тенденцию к закислению этих озер.

В пробах из осадков оз. Хмелевского идентифицировано 59 таксонов-индикаторов pH, которые подразделяются на пять групп: ацидофилы (30 таксонов), ацидобионты (один таксон), алкаифилы (семь таксонов), алкалибионты (два таксона) и индифференты (17 таксонов). Обращают на себя внимание две отличительные особенности таксономического состава диатомовых комплексов из этого озера. Особенность состоит в очень незначительной доле диатомовых водорослей, предпочитающих кислую реакцию среды (<1 %); более чем в половине проб они вообще отсутствуют. Вторая особенность выражена в очень высокой отрицательной корреляционной зависимости между значениями относительной численностью группы индифферентов и группы диатомовых водорослей, предпочитающих щелочную среду (–0.98). Тренд численных значений pH позволяет сделать заключение, что катионно-

анионный баланс в озере за анализируемый промежуток времени заметно не менялся (рис. 6).

В пробах из осадков оз. Кардывач идентифицировано 173 таксона-индикатора pH, которые подразделяются на четыре группы: ацидофилы (25 таксонов), алкаифилы (61 таксон), алкалибионты (17 таксонов) и индифференты (70 таксонов). Реконструкция изменения уровня pH на акватории озера проводилась в несколько этапов. Расчет численных значений по новой методике подтвердил высокую стабильность оз. Кардывач как единой экосистемы [10]. Большинство рассчитанных значений pH меняются в очень небольшом интервале (7.38–7.22). Исключение составляет значение pH, рассчитанное для интервала 11–12 см (7.02). Однако это отклонение от остальных значений относительно невелико и не меняет общей картины стабильного катионно-анионного баланса в озере (рис. 6). Наиболее вероятно, что это отклонение связано с погрешностью при подсчете и идентификации створок. При изготовлении постоянных препаратов створ-

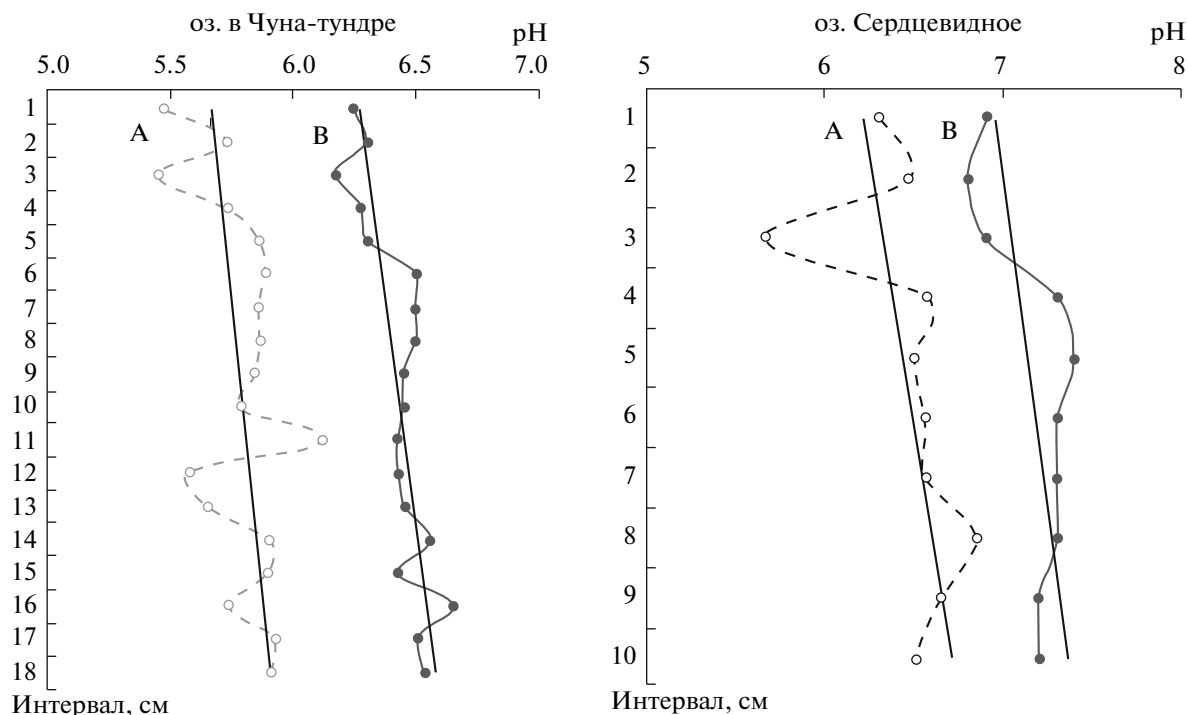


Рис. 5. Изменение численных значений pH в двух горных озерах Кольского п-ова: А — по данным [6] и методике [7], В — по данным [6] и методике [19].

ки могут распределиться под покровным стеклом неравномерно: наиболее крупные створки остаются в центре, а более мелкие распределяются по периферии. Это достаточно частое явление (так называемая “разгонка” створок при подогревании препарата с целью расплавления до жидкостной фазы постоянных сред). В этом случае даже корректная по объему выборка (в данном случае 300 створок) может не компенсировать их неравномерного распределения в препарате. В водной среде оз. Кардывач доминируют две группы диатомовых водорослей: индифференты, предпочитающие нейтральную среду, и группа таксонов-индикаторов щелочной среды (алкалибионты и алкалифилы). Обе группы меняют свою относительную численность по разрезу колонки. При этом наблюдается высокий уровень отрицательной корреляционной зависимости между ними (-0.88).

Диатомовые водоросли, предпочитающие кислую реакцию среды, составляют значимое количество в осадках из оз. Кардывач. Динамика изменения относительной численности этой группы по разрезу проанализированной колонки весьма своеобразна. Изменение относительной численности этой группы имеет “компенсационный” характер, иначе говоря, приводит к минимизации изменения расчетных значений pH. Соответственно, индексы корреляции этой группы (ацидофилы) с двумя основными индикационными группами невелики

(-0.1 с группой индифферентов, -0.3 с группой алкалифилов и алкалибионтов).

Несмотря на различные размеры и заметное несовпадение по другим классификационным признакам (видовое разнообразие, соотношение биоиндикационных групп, уровень трофометаболической целостности), озера Хмелевское и Кардывач объединяет полное отсутствие тенденции направленного смещения катионно-анионного баланса за анализируемый промежуток времени (рис. 6).

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЦИКЛОВ

Еще на начальном этапе изучения биоиндикационной значимости диатомовых водорослей установлено, что интервал оптимальных и допустимых температур у этой систематической группы очень широк. Устойчивая вегетация у большинства видов происходит в интервале от $+1$ до $+30^{\circ}\text{C}$ [1]. Допустимые условия для существования — от -36 до $+50^{\circ}\text{C}$ [3]. Вероятно, этот интервал можно расширить, особенно в сторону положительных температур (с учетом наблюдений в горячих источниках).

В связи с этим классификационные признаки по температурной приуроченности носили общий характер. Все таксоны низшего ранга разделены на три группы: криофилы (холодолоби-

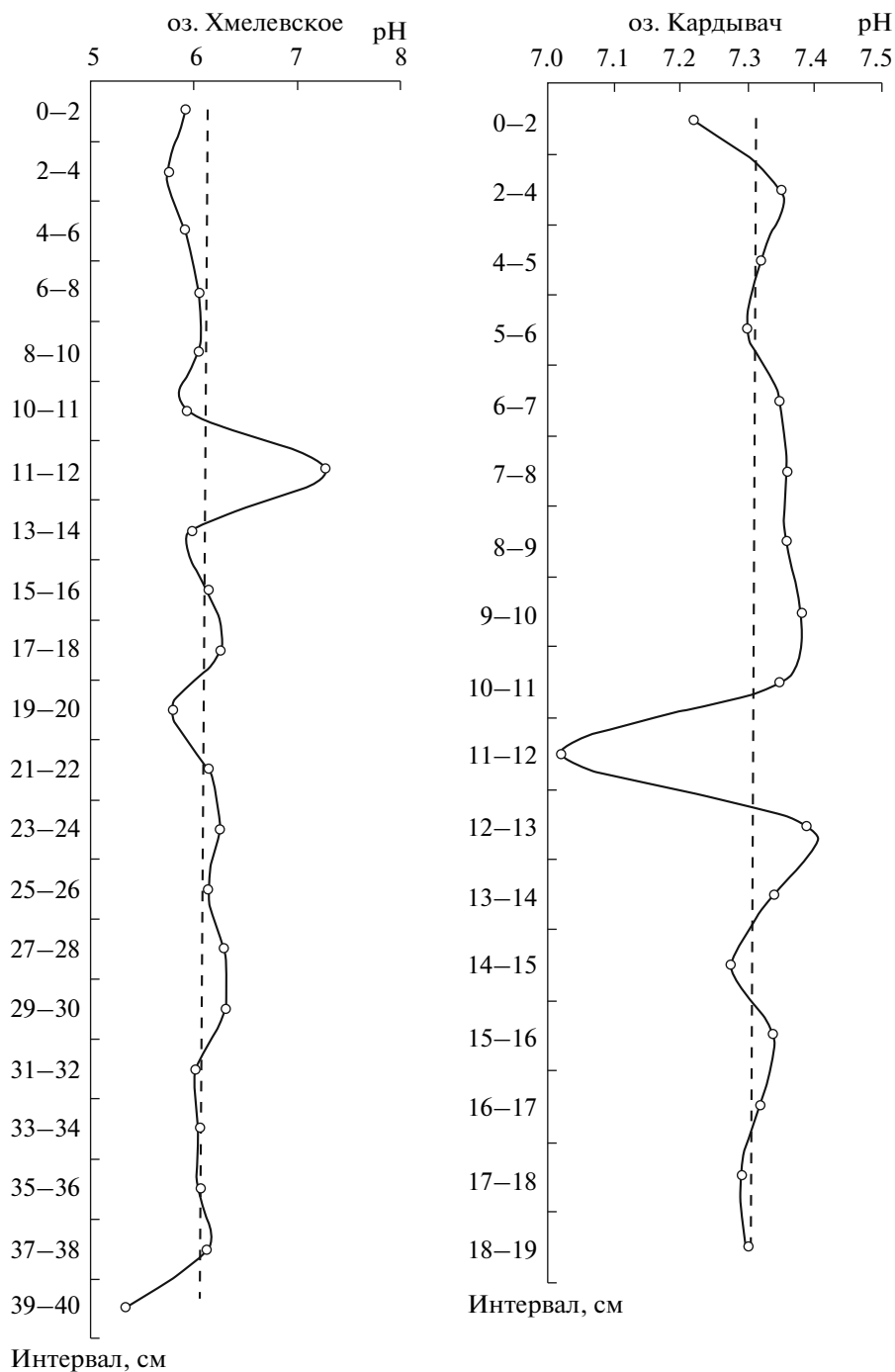


Рис. 6. Изменение численных значений рН в горных озерах Хмелевском и Кардывач по методике [7].

вые), термофилы (теплолюбивые) и виды, оптимум развития которых лежит в интервале от +10 до +20°C. Помимо этого, внутри каждой группы выделяют stenothermные и eurythermные формы (с узким и широким температурным интервалом развития).

Реконструкция температуры в озерах на основе диатомового анализа как отдельная расчетная

процедура обычно не проводится. В сопроводительных диаграммах обычно указывается процентная доля тех или иных таксонов по их географической приуроченности: северо-альпийские формы, бореальные, субтропические и т.д. Такая градация (по широтно-климатической приуроченности) отчасти подразумевает предпочтительность того или иного температурного интервала. Обобщенная сводка, в которой приведены ре-

зультаты индикации по температурной устойчивости более 420 таксонов, опубликована в [24].

При расчете температуры ($t^{\circ}\text{C}$) озерных вод предложена методика, аналогичная уже описанной для расчета S и уровня рН:

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{\sum t_i k}{\sum k},$$

где t_i — индивидуальное численное значение для каждого таксона-индикатора, $^{\circ}\text{C}$; k — коэффициент относительного обилия, рассчитанный по шестиступенчатой шкале [11].

При расчете индивидуальных численных значений по температурной приуроченности (t_i) применена та же методика, что и при расчете индивидуальных численных значений по рН-приуроченности (ph_i): при наличии данных, представленных в виде численного интервала, рассчитывалось его среднее значение; всем холодноводным формам по литературным источникам присвоен средний показатель (численное значение), равный 10°C , а тепловодным — 20°C .

Как и в случае с расчетом показателя рН, этот подход дал возможность расширить спектр таксонов-индикаторов при реконструкции температуры.

Реконструкция температурного режима оз. Хмелевского выявила определенную цикличность. Всего по разрезу колонки ДО располагается семь циклов изменения температурного режима (рис. 7).

Исходя из аналогичных построений, проведенных для других озер [8, 9], сделан вывод, что большинство циклов, выделенных в верхней и средней части разреза ДО, предположительно соответствуют 11-летним циклам. Три выделенных цикла образуют 33-летний цикл и являются частью более длительного, так называемого “столетнего” цикла инсоляционной активности [4]. На основе собственных расчетов В.С. Ковалевский [4] выделяет циклы, длящиеся ~ 106 лет. Следовательно, если “верхние” четыре или пять циклов — 11-летние, а “нижние” два или три цикла — 33-летние, то время накопления проанализированных осадков составляет 120–150 лет, а темпы осадконакопления составляют ~ 2.5 – 3.5 мм/год. Окончательное заключение можно сделать только на основе изотопного датирования возраста осадков. Полученный тренд численных значений свидетельствует о значительном повышении температуры в озере (на $>4^{\circ}\text{C}$). Вероятнее всего, это связано с обмелением озера, что определило его более интенсивное прогревание в период вегетационной активности.

В пробах из осадков оз. Кардывач было идентифицировано 34 таксона-индикатора температуры. Расчет численных значений температур проводился по всему спектру таксонов-индикаторов, что позволило выделить три температур-

ных цикла: два полных и один неполный (рис. 7). Предположительная длительность каждого этих циклов соответствует 100-летним циклам инсоляционной активности. Темп осадконакопления в оз. Кардывач очень невысок и составляет <1 мм/год. Однако окончательный вывод о длительности выделенных циклов можно будет сделать только после получения изотопных датировок. Эта ситуация наглядно демонстрирует как возможность диатомового анализа, так и границы его применения. В данном случае достоверность выделенных циклов не подвергается сомнению, а вот их длительность предположительна. Не стоит забывать, что в процессе анализа колонок из других озер также достоверно были выявлены циклы меньшей длительности: 33- и 11-летние. Полученный тренд численных значений свидетельствует о том, что за анализируемый промежуток времени (какую длительность он бы ни составлял) произошло заметное повышение среднегодовых температур в озере (на $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$).

Между температурными циклами, выделенными в обоих озерах (Хмелевском и Кардывач), наблюдается значимая корреляция, несмотря на различные размеры озер и темпы накопления ДО. Это также подтверждает определяющее значение внешнего инсоляционного воздействия на температурный режим озер во времени (рис. 7).

РЕКОНСТРУКЦИЯ УРОВНЯ КОНЦЕНТРАЦИИ БИОГЕНОВ (САПРОБНОСТЬ)

Опыт аналогичных исследований, проведенных на озерах различной размерности, расположенных на различных широтах, дает возможность утверждать, что долговременные тенденции изменения температурного режима (температурные циклы) оказывают воздействие на уровень сапробности озерных вод [8 – 10]. Цикличность в изменении уровня сапробности менее упорядочена, она не всегда совпадает с температурными циклами, но объективно существует. Следовательно, если температурные циклы в озерах Хмелевском и Кардывач имеют объективную сопряженность под воздействием инсоляционной активности, то аналогичная корреляция должна проявиться тем или иным образом в режиме изменения уровня сапробности.

В пробах из колонки ДО, отобранной в оз. Хмелевском, идентифицировано 19 таксонов-индикаторов сапробности, для которых имеются стандартные численные значения [1]. Расчет S позволяет классифицировать воды озера как ультраолиготрофные, приближающиеся к дистрофным. Численные значения S располагаются на шкале сапробности в пограничной области (0.48–1.16), между ксено- и олигосапробной зонами (рис. 8). Несмотря на значительное повышение

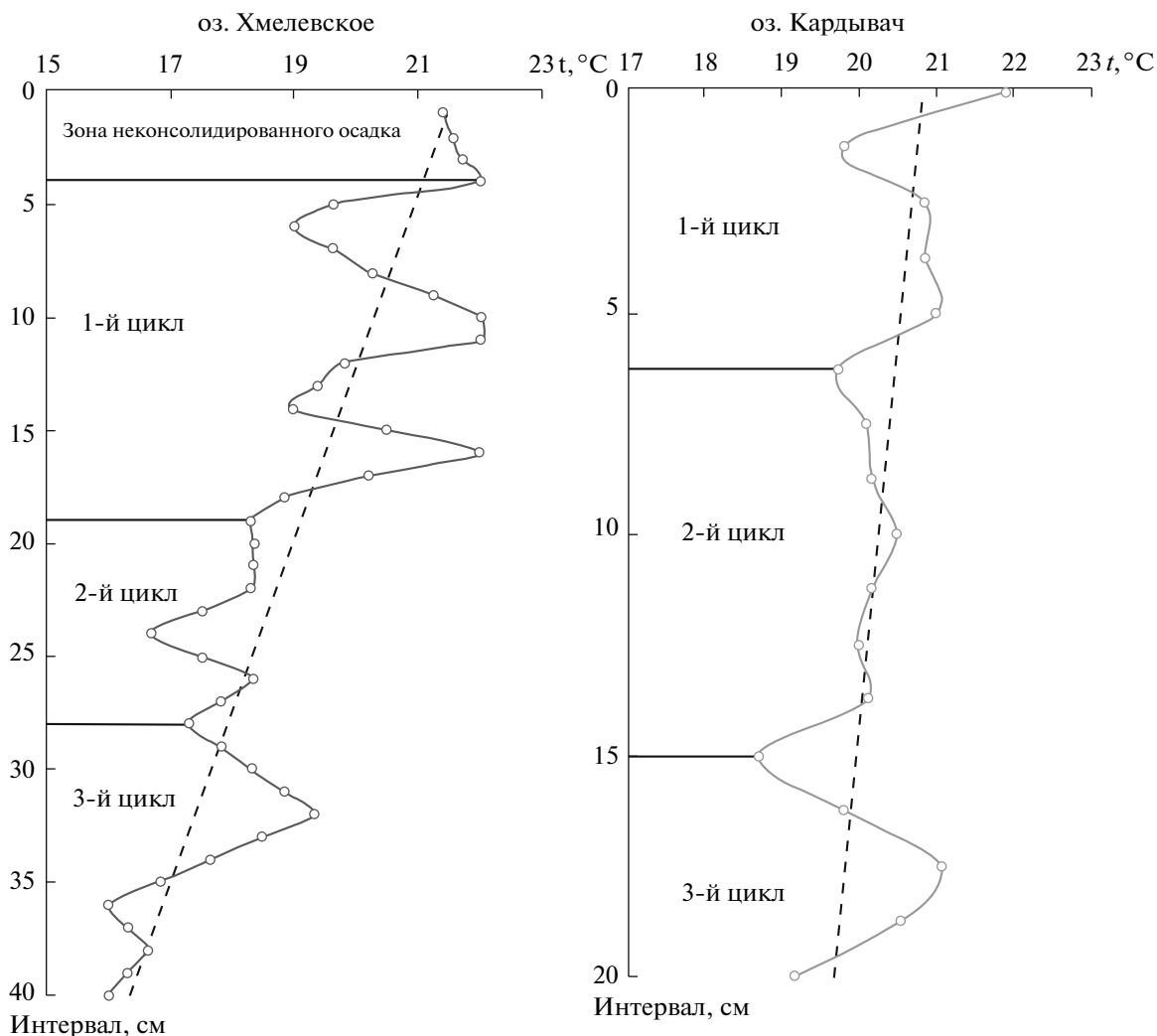


Рис. 7. Долговременные изменения температурного режима в горных озерах Хмелевском и Кардывач по методике [8, 9].

температуры в озере, повышение численных значений S не наблюдается. В значительной степени это объясняется доминированием в пробах вида *Tabellaria flocculosa* (Roth.) Kutz. Этот таксон-индикатор обладает низким индивидуальным численным значением сапробности (0.6). Кроме того, постепенное обмеление оз. Хмелевского, а следовательно, более интенсивное прогревание акватории, не оказывает значимого влияния на этот вид, приуроченный к прибрежной зоне.

В пробах из осадков оз. Кардывач было идентифицировано 62 таксона-индикатора сапробности, для которых имеются стандартные численные значения [1]. Расчет индекса сапробности по разрезу колонки оказался очень информативен. Воды озера можно классифицировать как олиготрофные. Численные значения S меняются в интервале от 1.16 до 1.36 (рис. 8). Это косвенным образом подтверждает низкие темпы осадконакоп-

ления в озере. Как и ожидалось, в режиме долговременных изменений во времени для обоих озер выявлена определенная сопряженность, выраженная в совпадении максимальных и минимальных численных значений S . Следует отметить отсутствие тенденции к увеличению трофности в озере, что можно ожидать, учитывая повышение за анализируемый промежуток времени численных значений температуры. Вероятно, такая стабильность численных значений S связана с достаточно высоким уровнем проточности озера и химическим составом обрамляющих пород.

ВЫВОДЫ

Изучение горных озер актуально для выявления основных тенденций изменения окружающей среды в исторической ретроспективе: глобальных процессов обогащения металлами, выпадения кислотообразующих веществ, а также вариаций

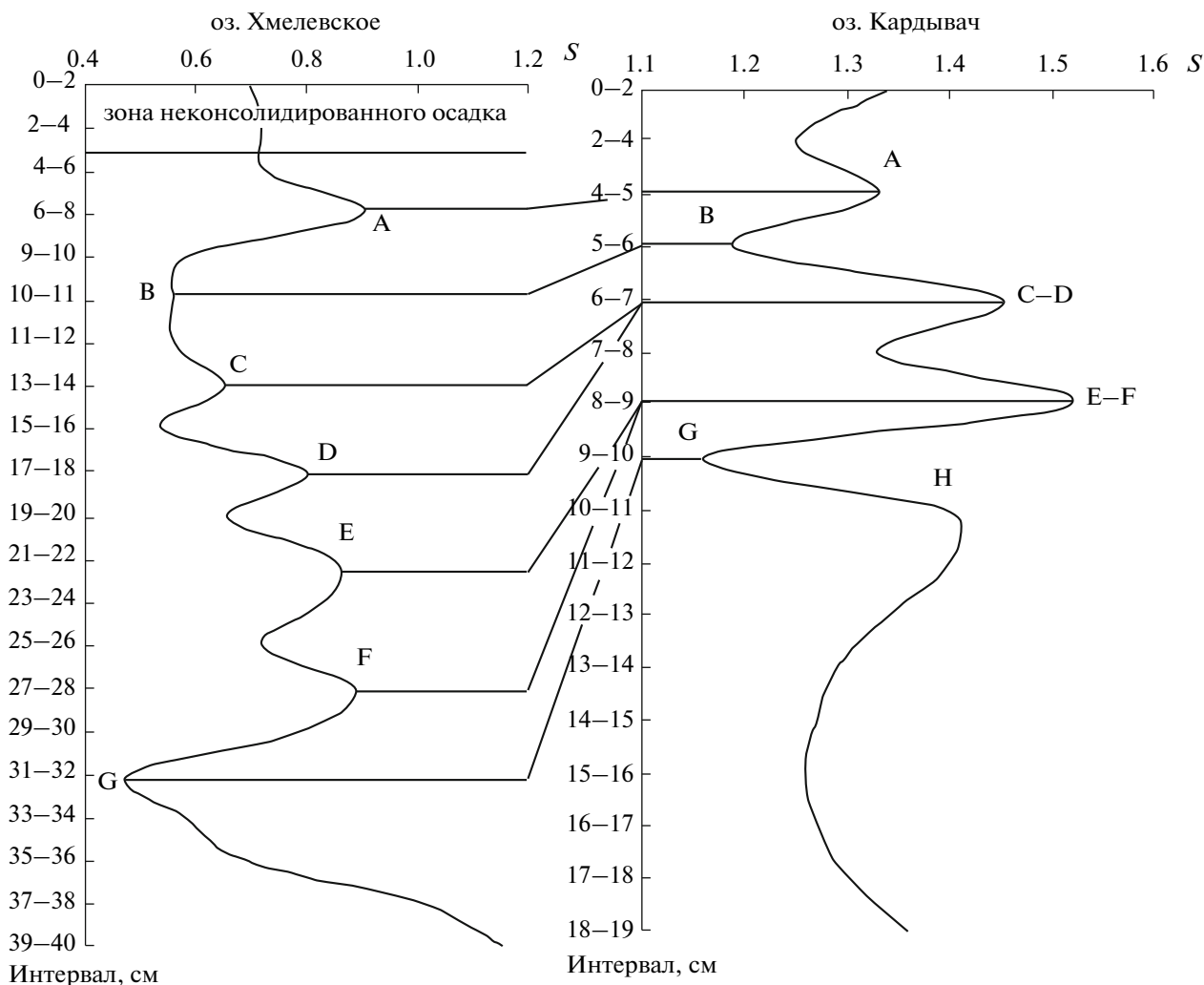


Рис. 8. Изменение численных значений S в горных озерах Хмелевском и Кардывач. А, В...F – минимальные и максимальные значения S , предположительно соответствующие одному времени формирования осадков в озерах.

климата. На основе исследования геохимического состава и диатомовой флоры слоев ДО четырех горных озер, расположенных на Кольском Севере и Кавказе, определены сходные процессы в озерных системах, протекающие с различной интенсивностью.

Для озер, расположенных в Хибинских горах и Чуна-тундре (Кольский Север), выявлена тенденция к развитию закисления (по диатомовой флоре) уже с глубины слоя 9–10 см ДО, которые сформировались в конце XIX – начале XX вв., т.е. в период индустриального развития Европы и, соответственно, загрязнения атмосферы сульфатами. В этот период отмечаются небольшие тенденции увеличения таких металлов, как Pb и Cd. Более глубокие преобразования состава диатомовых и аккумуляция Ni, Cu, Co и других металлов в ДО начались в 1940–1950 гг. (судя по скорости осадконакопления) и связаны с началом индустриального

освоения Кольского п-ова и функционирования медно-никелевых плавильных комбинатов.

Аналогичные тенденции накопления металлов, особенно Pb и Cd, обозначились в ДО озер Кавказа, при этом наиболее отчетливо аккумуляция металлов отмечается в ДО оз. Хмелевского, которое представляет собой бессточное зарастающее озеро с большой сезонной вариацией уровня воды. Выпавшие из атмосферы на водосбор этого озера ЗВ осаждаются в ДО, отражая глобальное загрязнение верхних слоев атмосферы. Для оз. Кардывач вследствие более высокого водообмена и влияния подземного притока эти тенденции очень слабо регистрируются. Несмотря на то, что оз. Хмелевское имеет низкие значения pH вод, близкие к атмосферным выпадениям, анализ диатомовой флоры не показал тенденций развития этого процесса, которое выявлено для горных озер Кольского Севера.

Для озер, расположенных в Кавказских горах, выявлена сопряженность температурных циклов и показателей сапробности. Установлена тенденция повышения среднегодовых температур озера (на ~1.5°C), которая рассчитана по соотношению видов-индикаторов в диатомовых комплексах из колонок ДО за анализируемый промежуток времени (приблизительно за последнее столетие).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.* Бирознообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив, 2006. 498 с.
2. Диатомовые водоросли СССР. Ископаемые и современные. Л.: Наука, 1974. Т. 1. 403 с.
3. Диатомовый анализ / Под ред. Криштофовича А.Н. М.: Гостеолиздат, 1949. Кн. 1. 240 с.
4. *Ковалевский В.С.* Многолетние колебания уровней подземных вод и подземного стока. М.: Наука, 1976. 270 с.
5. *Моисеенко Т.И.* Закисление вод: факторы механизмы и экологические последствия. М.: Наука, 2003. 276 с.
6. *Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Каган Л.Я.* Горные озера как индикаторы загрязнения воздуха // Вод. ресурсы. 1997. Т. 24. № 5. С. 600–608.
7. *Моисеенко Т.И., Разумовский Л.В.* Новая методика реконструкции катионно-анионного баланса в озерах (диатомовый анализ) // Докл. РАН. 2009. Т. 427. № 1. С. 132–135.
8. *Разумовский Л.В.* Реконструкция температурных циклов и сукцессионных изменений по диатомовым комплексам из донных осадков на примере озера Галичского // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 5. С. 570–582.
9. *Разумовский Л.В., Гололобова М.А.* Реконструкция температурного режима и сопряженных гидрологических параметров по диатомовым комплексам из озера Глубокого // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 4. С. 490–504.
10. *Разумовский Л.В., Моисеенко Т.И.* Оценка пространственно-временных трансформаций озерных экосистем методом диатомового анализа // Докл. РАН. 2009. Т. 429. № 2. С. 1–4.
11. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. Абакумова В.А. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 320 с.
12. Унифицированные методы исследования качества вод. Ч. 3. Методы биологического анализа вод. М.: СЭВ, 1976. 185 с.
13. Acid rain analysis. Intercomparison 1/93. Documenta dell' Instituto di Idrobiologia. 1994. № 47. 36 p.
14. *Batterbee R.W., Wathne B.M., Joannessen M. et al.* Remote mountain lakes as indicators of environmental change // Proc. of SETAC Conference, Copenhagen, 1997. P. 240–237.
15. *Charles D.F.* Relationships between surface sediment diatom assemblages and lake water characteristics in Adirondack lakes // Ecology. 1985. V. 66. P. 994–1011.
16. *Dauvalter V.* Heavy metals in lake sediments of the Kola Peninsula // Sci. Tot. Environ. 1994. V. 158. P. 51–61.
17. *Davis R.B., Anderson D.S.* Methods of pH calibration of sedimentary diatom remains for reconstructions history of pH in lakes // Hydrobiologia. 1985. V. 120. P. 69–87.
18. *Hustedt F.* Systematische und oecologische Untersuchungen über die Diatomeen – Flora von Java, Bali, und Sumatra nach dem Material der Deutschen Factorin und ihr Einfluss auf die Diatomeenflora // Arch. Hydrobiol. Suppl. 1939. V. 16. P. 247–394.
19. *Merilainen J.* The diatom flora and the hydrogenion concentration of the water // Ann. Bot. Fenn. 1967. V. 4. P. 51–58.
20. *Moiseenko T.* Acidification and Critical Loads in Surface Waters: Kola, Northern Russia // AMBIO. 1994. V. 23. P. 418–424.
21. *Mossello R., Wathne B., Rose N. et al.* The MOLAR Project: atmospheric deposition and lake water chemistry // J. Limnology. 1999. V. 58 (2). P. 88–106.
22. *Norton S. A., Dillon P. J., Evans R. D. et al.* The history of atmospheric deposition of Cd, Hg and Pb in North America: Evidence from lake and peat bog sediments // Acidic Precipitation / Ed. Lindberg S.E. N.Y.: Springer-Verlag, 1990. P. 73–101.
23. *Nygaard G.* Ancient and recent flora of diatoms and Chrysophyceae in Lake Gribso // Fol. Limnol. Scand. 1956. 8. V. P. 32–94
24. *Patrick R.* The effects of increasing light and temperature on the structure of diatom communities // Limnol. and Oceanogr. 1971. V. 16 (16). P. 405–421.
25. *Renberg I., Hellberg T.* The pH history of lakes in southwestern Sweden, as calculated from the subfossil diatom flora of the sediments // AMBIO. 1982. V. 11. P. 30–33.
26. *Skogheim O.K.* Rapport fra Arungenprosjektet. As – NLH. 1979. № 2. P. 7
27. *Sládeček V.* System of water quality from the biological point of view // Arch. Hydrobiol., Beiheft., Erdeb. Limnol. 1973. № 7. P. 1–218.
28. *Wathne B.M., Patrick S.T., Monteith B. et al.* Acidification of Mountain Lakes: Palaeolimnology and Ecology (AL:PE). Brussel: European Commission, 1995. Report EUR16129 EN. 292 p.
29. *White J.R., Gubala C.P.* Sequentially extracted metals in Adirondack lake sediment cores // J. Paleolim. 1990. V. 3. P. 243–252.