

КАЧЕСТВО ВОДЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ ОЗ. ПЮХЯЯРВИ

А. В. Рябинкин, П. А. Лозовик, Т. П. Куликова,
А. В. Литвиненко, М. В. Калмыков

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

ВВЕДЕНИЕ

В Республике Карелия как приграничном регионе России в последние десятилетия активно развивается международное сотрудничество в различных сферах деятельности. В рамках реализации международных проектов были подготовлены обоснования приграничных особо охраняемых природных территорий (ООПТ), в том числе парков «Дружба», «Калевальский», «Тулос», «Кой-тайоки», НП «Паанаярви». Совместно с финскими специалистами были исследованы экосистемы приграничных территорий республики и предложена идея создания так называемого «Зеленого пояса Фенноскандии». Суть ее заключается в поэтапном формировании системы ООПТ вдоль российско-финляндской государственной границы, которые должны обеспечить сохранение биологического разнообразия, способствовать улучшению общей экологической ситуации в регионе, содействовать развитию принципов устойчивого природопользования и международному сотрудничеству в области охраны природы (Titov et al., 1995). Биологическое разнообразие Северной Европы представлено уникальными природными комплексами мирового ранга, за их охрану Россия (а вместе с ней Республика Карелия) несет особую ответственность. Исследования, осуществляемые в рамках международных мультидисциплинарных программ и проектов и направленные на изучение, сохранение и рациональное использование природного наследия Республики Карелия, тесно связаны с вопросами экологического просвещения (Иешко и др., 2006).

Одним из примеров двустороннего российско-финляндского сотрудничества является проект «Оценка экологического состояния пограничного водоема», основной целью которого является оценка возможных изменений в экологическом статусе оз. Пюхяярви в условиях антропогенного эвтрофирования.

Озеро Пюхяярви – пограничный водоем, большая его часть которого, 200 км² или 4/5 площади акватории, расположена на территории Финляндии и около 48 км² – на территории России (Республика Карелия) (рис. 1). Озеро относится к бассейну р. Вуоксы и Ладожского озера. В гидрологическом отношении оз. Пюхяярви представляет собой достаточно крупный водоем

(248 км²) с небольшим водосбором (1045 км²) и замедленным водообменом (около 7,5 года) (Niinioja, Ahtiainen, 1987).

Западная часть озера, расположенная на территории Финляндии, подвержена интенсивному антропогенному воздействию и активно эвтрофируется (Paasivirta, 1987), в то время как восточная, российская его часть, вследствие особого пограничного режима и почти полного отсутствия на ее водосборе хозяйственной деятельности, находится в естественном состоянии (Рябинкин и др., 1997). В данном случае восточную часть озера можно рассматривать в качестве относительно чистой зоны.

Комплексные исследования по оценке экологического состояния на финляндской части акватории Пюхяярви проводятся регулярно (Luotonen et al., 2002; Kukkonen et al., 2005). Такого рода наблюдений на территории России ранее не проводилось. В 1978–1980 гг. были выполнены первые рекогносцировочные работы в рамках Советско-Финляндской пограничной водной комиссии (Ryzkov et al., 1987). В данной работе представлены результаты, полученные в рамках совместного проекта на российской части оз. Пюхяярви в 1991–2004 гг.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОСБОРНОГО БАССЕЙНА

На территории Карелии водосборная площадь оз. Пюхяярви протянулась очень узкой полосой вдоль восточного и частично южного его берегов. Ширина этой полосы составляет преимущественно 1–2 км и только на отдельных участках достигает 4–5 км. Общая площадь карельской части равна 11 110 га* (без акватории самого водоема).

Вследствие большой близости водораздела к основному водоприемнику (оз. Пюхяярви) речная сеть изученной территории представлена небольшими ручьями, максимальная протяженность самого длинного из них (руч. Сурийоки) составляет 7 км. Большинство ручьев (17) являются непосредственно притоками

* Гидрометрические работы выполнены по топографической карте масштаба 1 : 50 000 (бумажная и электронная версии с использованием ГИС-программы MapInfo).

оз. Пюхьярви, имеются также четыре притока второго порядка и один – третьего. При этом следует иметь в виду, что в расчетах учитывались только водотоки длиной не менее 500 м. Суммарная длина всех ручьев составляет 40,9 км, а густота речной сети – 0,37 км на км², что несколько ниже, чем в среднем по Карелии (более 0,5 км/км²). Кроме того, отмечено несколько мелиоративных канав. Ряд ручьев, соединяя между собой небольшие озера и ламбушки, представляют собой миниатюрные «озерно-речные системы». Всего на рассматриваемой территории установлен 41 водоем* с площадью более 1 га. Часть из них не имеет видимого стока. Общая площадь этих водоемов составляет 825 га. Наиболее крупными из них являются оз. Лиевяярви (256 га) и Суоярви (76 га). Имеется также довольно крупное озеро Корпийрви, разделенное государственной границей примерно пополам. Коэффициент озерности равен 7,4%, что существенно меньше среднекарельского показателя, который составляет 12% без учета Онежского и Ладожского озер (с учетом – 21%).

В целом регион представляет собой сравнительно пересеченную лесистую местность с отдельными холмами и достаточно отчетливо выраженным водоразделом, покрытую в основном хвойно-лиственными и еловыми вторичными лесами, сформировавшимися после интенсивных рубок конца 19-го и первой половины 20-го столетия. Все же и в последнее время производились санитарные и сплошные рубки в непосредственной близости от озера, но оценить их количественные показатели трудно.

Среди залесенных территорий встречаются отдельные небольшие болотные массивы. Всего учтено 41 болото. Их суммарная площадь составляет 550 га, а коэффициент заболоченности равен 5%. Это значительно ниже, чем в среднем по Карелии (30% болот и заболоченных земель). Отмечены также следы заброшенных поселений.

Постоянное население на территории карельской части водосбора оз. Пюхьярви отсутствует. Однако здесь постоянно пребывает небольшое число военнослужащих пограничных войск РФ. Кроме того, территория посещается жителями близлежащих поселков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы воды на химический анализ были отобраны в 2003–2004 гг., на биологический (зоопланктон, бентос) – в 1991, 2002–2003 гг. на всей акватории российской части (рис. 1).

Лабораторный анализ химических проб был выполнен в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН, имеющей аккредитацию. Для анализа использовались аттестованные методики Госстандарта России (табл. 1).

Пробы зоопланктона были отобраны процеживанием 100 л воды через сеть Джели (сито № 55, размер ячеек 0,099 мм) и зафиксированы 4% формалином. Организмы просчитывались под микроскопом с дальнейшим пересчетом на 1 м³ воды. Пересчет средних показателей численности и биомассы производился с учетом объемов воды соответствующих горизонтов. При вычис-

Таблица 1
МЕТОДЫ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВОДЫ

Параметр	Аналитический метод
pH	Потенциометрическое определение стеклянным электродом
Температура и электропроводность	Кондуктометрическое определение измерителем температуры и электропроводности воды
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Fe _{общ.} , Mn	Пламенное атомно-абсорбционное спектрометрическое определение
Na ⁺ , K ⁺	Пламенно-фотометрическое определение
Щелочность	Потенциометрическое определение (pH 4,5–4,2)
SO ₄ ²⁻	Фотометрическое определение с Ва ²⁺ и сульфонаазо III, λ = 640 нм
Cl ⁻	Фотометрическое определение с роданидом ртути и нитратом железа (III), λ = 460 нм
NH ₄ ⁺	Фотометрическое определение с гипохлоритом и фенолом, λ = 630 нм
NO ₂ ⁻	Фотометрическое определение с сульфаниламидом и N-(1-нафтил)-этилендиамин
NO ₃ ⁻	Восстановление до NO ₂ ⁻ на Cd-Cu редуторе и определение NO ₂ ⁻
N _{общ.}	Окисление K ₂ S ₂ O ₈ в щелочной среде под давлением и определение NO ₃ ⁻
P _{мин.}	Фотометрическое определение с молибдатом аммония и аскорбиновой кислотой, λ = 882 нм
P _{общ.}	Окисление K ₂ S ₂ O ₈ в кислой среде и определение P _{мин.}
Перманганатная окисляемость (ПО)	Титриметрическое определение в кислой среде
Цветность	Визуальное определение с использованием компаратора
S _{орг.}	Фотохимическое определение в системе непрерывного газового потока
O ₂	Титриметрическое определение по Винклеру
Si	Фотометрическое определение с молибдатом аммония, λ = 410 нм
Взвешенное вещество	Гравиметрическое определение после фильтрования на мембранных фильтрах с размером пор 1,5 мкм
Мутность	Фотометрическое определение по формазину, λ = 530 нм

* В это число не включено оз. Ристилаhti, являющееся заливом оз. Пюхьярви, имеющим собственное название.

лении биомассы зоопланктона использовался сырой (формалиновый) вес организмов (с учетом размеров). Обработка материала проведена по общепринятой методике (Методические рекомендации..., 1984а).

Количественные пробы бентоса отбирали дночерпателем Экмана-Берджа (площадь 0,025 м²). На каждой станции отбирали по две пробы, которые промывали через сито № 23 и фиксировали предварительно раскисленным 4% формалином. В лабораторных условиях под микроскопом МБС-9 из промытого остатка выбирали организмы макрозообентоса, подразделяя их на систематические группы. Животных взвешивали в сыром виде на торсионных весах с точностью до 0,5 мг. Разобраный и взвешенный материал фиксировали 70% этанолом (Методические рекомендации..., 1984б).

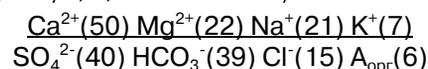
ХАРАКТЕРИСТИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ

Для характеристики химического состава воды озера были исследованы главные ионы, содержание органического вещества, биогенных (P, N) и литофильных (Fe, Mn, Si, Al) элементов, кислорода и pH воды.

Содержание макрокомпонентов и микрокомпонентов характеризуется однородным распределением как по глубине, так и по акватории исследованного района озера. Исключение составляет губа Ристилаhti (ст. 8), выделяющаяся повышенным содержанием органи-

ческих веществ, что связано с влиянием гумусного притока. Следует отметить, что все показатели воды российской части озера близки к наблюдаемым на остальной его акватории. Малая приточность в озеро обуславливает локальное распространение речных вод в отдельных губах, тогда как основная водная масса озера имеет близкие характеристики, на что указывают не только данные последних лет наблюдений, но и сравнение результатов многолетних исследований на оз. Пюхьяярви как финских коллег (Niinioja, Ahtiainen, 1987), так и российских в 1978–1980 гг. (Ryzkov et al., 1987). В целом в озере отмечаются стабильные характеристики качества воды. Если рассмотреть отдельные группы веществ, то оз. Пюхьяярви имеет определенные гидрохимические особенности по сравнению с другими водными объектами российской Карелии и, возможно, Финляндии.

Ионный состав воды. В ионном составе воды существенную долю составляют сульфаты и кальций (табл. 2). Так, осенью формула ионного состава выглядит следующим образом:
Σ_и – 35,7 мг/л, 0,52 ммоль-экв./л



Аналогичное распределение ионов наблюдается в зимний период с незначительным увеличением эквивалентной доли гидрокарбонатов:

Σ_и – 36,5 мг/л, 0,51 ммоль-экв./л

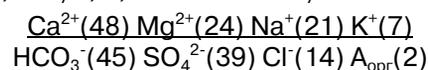


Таблица 2

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ (α), МИНЕРАЛИЗАЦИЯ (Σ_и) И ИОННЫЙ СОСТАВ ВОДЫ оз. ПЮХЯЯРВИ

№ ст.	Горизонт, м	α (25 °С), мкСм/см	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ _и
			мг/л							
Сентябрь 2003 г.										
1	1,0	54,7	5,20	1,38	3,09	1,73	13,10	3,12	8,26	35,88
	19,0	57,9	5,40	1,37	2,52	1,36	10,40	2,56	12,33	35,94
2	1,0	55,2	5,56	1,45	2,31	1,43	13,60	2,63	9,50	36,48
	13,0	56,2	5,17	1,43	2,19	1,38	12,60	2,54	9,58	34,89
3	1,0	60,8	5,32	1,35	2,46	1,35	11,30	2,67	9,70	34,15
	12,0	56,4	5,13	1,35	2,61	1,37	12,90	2,59	9,48	35,43
4	1,0	59,3	5,07	1,37	2,52	1,45	11,80	2,95	10,84	36,00
	12,0	56,4	5,04	1,31	2,19	1,34	12,80	2,54	8,44	33,66
5	1,0	57,2	4,97	1,38	2,70	1,45	12,00	2,84	10,08	35,42
	11,0	54,9	5,24	1,43	2,38	1,36	13,00	2,54	10,98	36,93
6	1,0	55,9	5,30	1,45	2,55	1,39	13,00	2,62	10,06	36,37
	9,0	55,3	5,30	1,48	2,50	1,36	13,50	2,60	10,89	37,63
7	1,0	55,6	5,17	1,43	2,63	1,38	12,80	2,50	9,05	34,96
	10,0	55,4	5,43	1,49	2,61	1,34	13,20	2,58	10,42	37,07
8	1,0	53,5	5,01	1,31	2,23	1,46	12,10	2,70	11,86	36,67
	5,0	53,1	4,91	1,30	2,38	1,36	12,40	2,54	8,90	33,79
Март 2004 г.										
1	1,0	57,4	4,9	1,6	2,56	1,42	14,3	2,74	10,1	37,62
	8,0	58,0	4,7	1,6	2,48	1,42	14,3	2,62	10,3	37,42
	15,0	58,5	4,8	1,6	2,48	1,41	14,3	2,61	9,81	37,01
2	18,0	59,4	4,9	1,5	2,5	1,41	14,1	2,53	9,52	36,46
	1,0	58,3	5,1	1,5	2,46	1,4	14,1	2,59	9,28	36,43
	5,0	57,6	5,2	1,5	2,46	1,38	13,8	2,62	9,38	36,34
	10,0	57,8	4,6	1,4	2,53	1,43	13,7	2,68	8,85	35,19
13,0	57,8	5,1	1,5	2,49	1,39	13,3	2,47	8,97	35,22	

По общепринятой в России классификации О. А. Алекина воды озера относятся к смешанному классу: гидрокарбонатно-сульфатному (зимой) и сульфатно-гидрокарбонатному (осенью), группе кальция. Необычным является то, что вода тяготеет к сульфатному классу. Причины могут быть связаны с разгрузкой в озеро подземных вод сульфатного класса и наличием сульфидов, рассеянных в породах на водосборе озера. Действительно, в подземных водах Финляндии (The geochemical Atlas..., 1990) в этом районе отмечается повышенное содержание сульфатов. Аналогичное явление имеет место и на территории Карелии в Приладожье (Ресурсы..., 1987). В этих районах по сравнению с другими содержится больше сульфатов и в поверхностных водах (Лозовик, 1998). Необычным является то, что оз. Пюхярви имеет большую площадь, но при этом очень малый удельный водосбор ($\Delta F_{уд} = 3,2$). Для таких озер характерны высокая доля атмосферного питания и, как правило, низкие величины минерализации и щелочности воды. Здесь мы имеем достаточно высокие показатели (на уровне воды Онежского озера). В чем причина такой «аномалии», т. е. за счет чего формируется такой необычный ионный состав воды, остается для нас неясным. Факторы антропогенного влияния исключаются, поскольку нет источников с сульфатным видом загрязнения.

Сравнивая данные многолетних наблюдений, следует отметить очень стабильный ионный состав воды (Ninnioja, Ahtiainen, 1987). Имеющиеся различия статистически незначительны, возможно, они связаны с использованием разных методов анализа воды.

Органическое вещество. Вследствие малого удельного водосбора и значительного времени водообмена оз. Пюхярви характеризуется весьма низким содержанием ОВ (табл. 3). Так, средняя величина цветности в осенний период на большинстве станций (кроме ст. 8) составляла 11–19 град. (среднее 13 град.), ПО – 3,6 мг О/л, $C_{орг}$ – 4,4 мг/л и только в губе Ристилахти (ст. 8) эти показатели были выше (ЦВ – 55, ПО – 6,4 мг О/л, $C_{орг}$ – 6,8 мг/л), что связано с поступлением в губу речных гумусных вод. Аналогичные показатели наблюдались и в зимний период. В целом содержание ОВ в оз. Пюхярви очень низкое и соответствует олигогумусному типу водоемов. Если более детально рассмотреть косвенные показатели содержания ОВ, то можно отметить значительную долю автохтонного ОВ в воде озера. Так, предварительные расчеты по разработанной в ИВПС методике показали, что доля автохтонного ОВ в основной водной массе в осенний период составляла около 70%, а в зимний период – около 30%, при отношении С : N – 12 и 25 соответ-

ственно. В губе Ристилахти осенью доля автохтонного ОВ была всего 25%. Полученные данные свидетельствуют о существенном вкладе внутриводоемных процессов в баланс ОВ озера. Сравнивая результаты многолетних наблюдений в оз. Пюхярви, следует отметить очень стабильное содержание ОВ в воде.

Таблица 3

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И ЛИТОФИЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ВОДЕ оз. ПЮХЯРВИ

№ ст.	Горизонт, м	Цветность, град.	ПО, мг О/л	$C_{орг}$, мг С/л	Fe	Mn	Si	Al
					мг/л			
Осень 2003 г.								
1	1,0	13	3,96	4,4	0,031	0,007	1,06	0,031
	19,0	12	3,62	4,2	0,058	0,016	1,06	0,015
2	1,0	15	3,58	3,6	0,033	0,031	1,13	0,008
	13,0	13	3,54	3,7	0,036	0,015	1,15	0,011
3	1,0	12	3,58	4,9	0,036	0,014	1,11	0,013
	12,0	10	3,70	5,2	0,051	0,012	1,1	0,014
4	1,0	15	3,62	4,2	0,02	0,017	1,12	0,022
	12,0	12	3,38	4,1	0,025	0,01	1,12	0,007
5	1,0	16	3,46	4,7	0,071	0,022	1,15	0,037
	11,0	19	3,7	4,4	0,152	0,026	1,14	0,019
6	1,0	16	3,54	4,3	0,09	0,022	1,15	0,022
	9,0	15	3,62	4,8	0,218	0,038	1,15	0,028
7	1,0	11	3,38	4,2	0,026	0,018	1,18	0,011
	10,0	14	3,34	4,8	0,032	0,067	1,18	0,012
8	1,0	55	6,28	7,0	0,157	0,024	1,27	0,018
	5,0	55	6,52	6,6	0,166	0,021	1,26	0,017
Зима 2004 г.								
1	1,0	15	4,4	4,3	0,033	0,006	1,3	0,045
	8,0	18	3,7	4,3	0,035	0,006	1,3	0,024
	15,0	20	3,7	3,6	0,032	0,006	1,5	0,017
2	18,0	19	3,5	3,0	0,039	0,006	1,8	0,035
	1,0	17	3,7	3,5	0,070	0,025	1,3	0,025
	5,0	21	4,0	3,4	0,043	0,018	1,3	0,015
	10,0	34	5,0	3,4	0,179	0,022	1,6	0,012
	13,0	32	4,4	3,4	0,119	0,012	1,8	0,013

Биогенные элементы. Распределение биогенных элементов, как и других показателей, характеризуется высокой однородностью по акватории и глубине (табл. 4). Среднее содержание $P_{общ}$ в осенний период составляло 13 мкг/л, зимой – около 10 мкг/л при полном отсутствии неорганических реакционноспособных форм. Отмечается некоторое превышение содержания фосфора в осенний период по сравнению с зимним. Такая картина наблюдается на ряде водоемов Карелии. При активном фотосинтезе происходит как бы удержание фосфора планктоном в водной среде. Кроме того, зимой отсутствует поступление фосфора с атмосферными осадками и меньше взмучивание донных отложений литеральной зоны. По уровню содержания $P_{общ}$ исследованный район озера больше соответствует мезотрофному типу, что согласуется и с данными наблюдений финских коллег за содержанием хлорофилла в воде (3–5 мкг/л) (Niinioja, Ahtiainen, 1987).

Таблица 4
БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ВОДЕ оз. ПЮХЯЯРВИ

№ ст.	Гори-зонт, м	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄	NO ₂	NO ₃	N _{общ}
		мкг P/л					
Зима 2004 г.							
1	1,0	0,00	8,00	0,054	0,001	0,03	0,27
	8,0	0,00	7,00	0,055	0,000	0,04	0,27
	15,0	1,00	9,00	0,048	0,000	0,06	0,32
	18,0	1,00	8,00	0,046	0,000	0,09	0,29
2	1,0	0,00	12,00	0,074	0,000	0,05	0,29
	5,0	0,00	8,00	0,051	0,000	0,03	0,25
	10,0	0,00	16,00	0,043	0,000	0,06	0,29
	13,0	0,00	12,00	0,036	0,000	0,08	0,23
Осень 2003 г.							
1	1,0	0	9	0,060	0,001	0,003	0,63
	19,0	0	12	0,050	0,001	0,000	0,61
2	1,0	0	11	0,024	0,000	0,000	0,30
	13,0	0	9	0,022	0,000	0,042	0,38
3	1,0	0	11	0,124	0,000	0,003	0,67
	12,0	0	7	0,023	0,000	0,000	0,43
4	1,0	0	11	0,125	0,000	0,003	0,59
	12,0	0	18	0,033	0,000	0,001	0,42
5	1,0	0	17	0,065	0,000	0,002	0,54
	11,0	0	16	0,027	0,000	0,000	0,39
6	1,0	0	12	0,022	0,000	0,000	0,38
	9,0	0,5	23	0,021	0,000	0,001	0,41
7	1,0	0	15	0,025	0,000	0,003	0,36
	10,0	0	15	0,022	0,000	0,000	0,40
8	1,0	1	17	0,046	0,000	0,000	0,66
	5,0	0	10	0,051	0,000	0,000	0,60

Среди азотистых веществ наблюдается следующий тип их распределения:

осенью: NO₂⁻ < NO₃⁻ << NH₄⁺ << N_{орг}
 <0,001 0,004 0,05 0,44 мг N/л
 зимой: NO₂⁻ << NH₄⁺ ≤ NO₃⁻ < N_{орг}
 <0,001 0,05 0,06 0,17 мг N/л

Представленное распределение азотистых веществ подчеркивает активное протекание в водоеме процессов новообразования ОВ, сопровождающееся потреблением минеральных форм азота и накоплением N_{орг} и деструкцией ОВ, приводящее к накоплению нитратов зимой. Содержание N_{общ} в 2003–2004 гг. было близким к многолетним данным наблюдений (0,25–0,45 мг/л).

Литофильные элементы (Si, Fe, Mn, Al). Для оз. Пюхяярви характерно повышенное содержание в воде кремния (табл. 3). Так, зимой его средняя концентрация была 1,5 мг/л, осенью – 1,1 мг/л. Для сравнения, в Онежском озере Si – 0,3 мг/л, в Ладожском – 0,5 мг/л. Различие концентраций в зимний и осенний периоды связано с активным потреблением кремния фитопланктоном, особенно диатомовыми водорослями. К концу зимы происходит его частичная регенерация из створок водорослей и поступление из подстилающих пород, что и обуславливает увеличение концентрации Si.

Содержание Fe и Mn зимой было наименьшим на ст. 1 (Fe – 35, Mn – 6 мкг/л), тогда как на ст. 2 оно было выше (Fe – 103, Mn – 19 мкг/л). В осенний период концентрация Fe в основной водной массе составляла в среднем 42 мкг/л, Mn – 22 мкг/л, и только в придонных слоях ст. 5 и 6 содержание Fe достигало 150 и 220 мкг/л соответственно. Такие же величины наблюдались в заливе Ристилахти, что связано с поступлением в него речных гумусных вод. Необычным оказалось то, что наибольшие концентрации Fe отмечаются в придонных слоях не на более глубоководных станциях, как ст. 1, а на станциях меньшей глубины, как 5, 6, 2. Это дает основание полагать, что для оз. Пюхяярви существенно выщелачивание компонентов из подстилающих пород ложа озера. Возможно, этим обусловлено своеобразие ионного состава воды, что требует, однако, специальных исследований. Для Пюхяярви характерно повышенное содержание Al (в среднем 18 мкг/л) в сравнении с другими озерами Карелии (3 мкг/л, n = 34). С учетом повышенного содержания Si в озерной воде можно предположить, что для этого озера существенно выщелачивание алюмосиликатов из подстилающих глин.

Кислород и pH воды. Содержание кислорода в осенний период было однородным от поверхности до дна (9,4 мг O₂/л) и постоянным на всех станциях наблюдений (табл. 5). Аналогично

Таблица 5
КИСЛОРОД, ПРОЗРАЧНОСТЬ, МУТНОСТЬ И pH ВОДЫ оз. ПЮХЯЯРВИ

№ ст.	Гори-зонт, м	O ₂ , мг/л	Прозрачность, м	Мутность, ЕМФ/л	pH
Осень 2003 г.					
1	1,0	9,52	6,0	1,1	7,00
	19,0	9,48		1,2	6,65
2	1,0	9,50	4,5	0,2	7,08
	13,0	9,47		0,4	7,00
3	1,0	9,38	5,5	1,2	6,75
	12,0	9,35		1,0	7,03
4	1,0	9,45	4,0	1,0	6,85
	12,0	9,44		0,5	7,07
5	1,0	9,32	4,5	0,4	6,95
	11,0	9,54		0,4	7,05
6	1,0	9,51	4,5	0,2	7,04
	9,0	9,46		0,5	7,10
7	1,0	9,48	5,0	0,2	7,00
	10,0	9,50		0,2	7,08
8	1,0	9,42	2,5	1,0	6,97
	5,0	9,39		0,5	6,96
Зима 2004 г.					
1	1,0	13,34	91	1,0	7,08
	8,0	12,82		0,0	7,00
	15,0	11,33		0,5	6,83
	18,0	8,99		0,2	6,69
2	1,0	13,18	90	1,0	7,10
	5,0	12,84		0,4	7,00
	10,0	11,59		1,2	6,83
	13,0	9,92		0,5	6,75

распределяется и pH (6,7–7,1). В зимний период наблюдалась стратификация содержания кислорода, CO₂ и величины pH, причем содержание O₂ уменьшается ко дну, CO₂ – увеличивается (pH – уменьшается). Для этого озера кислотно-основное равновесие обусловлено всецело карбонатной системой, поэтому содержание CO₂ можно легко рассчитать по формуле:

$$\text{pH} = \text{pK}_1 + \lg \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]},$$

где pK₁ – показатель константы диссоциации угольной кислоты по первой ступени (6,35). По кривым распределения O₂ и CO₂ по глубине (рис. 2) можно оценить, что к моменту съемки в зимний период на ст. 1 было израсходовано около 20,5 г O₂ (0,64 моль) на деструктивные процессы в воде и донных отложениях, но при этом выделилось 14,6 г CO₂

(0,33 моль). Как следствие протекания процессов окисления ОВ в воде и донных отложениях наблюдается дефицит кислорода в придонных слоях озера. На станциях 1 и 2 зимой 2004 г. насыщение O₂ придонных слоев воды составляло 66 и 72% против 90% на поверхности. Многолетние данные R. Niinioja также свидетельствуют о постоянном дефиците кислорода в этом озере в придонных слоях в зимний период (20–60% насыщения). Оз. Пюхярви весьма мало устойчиво к увеличению органической и биогенной нагрузки, прежде всего фосфорной, поскольку рост последней будет приводить к накоплению автохтонного ОВ и к созданию еще большего дефицита кислорода зимой. Поэтому для этого озера весьма важным является нормирование антропогенной нагрузки для предотвращения ухудшения его кислородного режима.

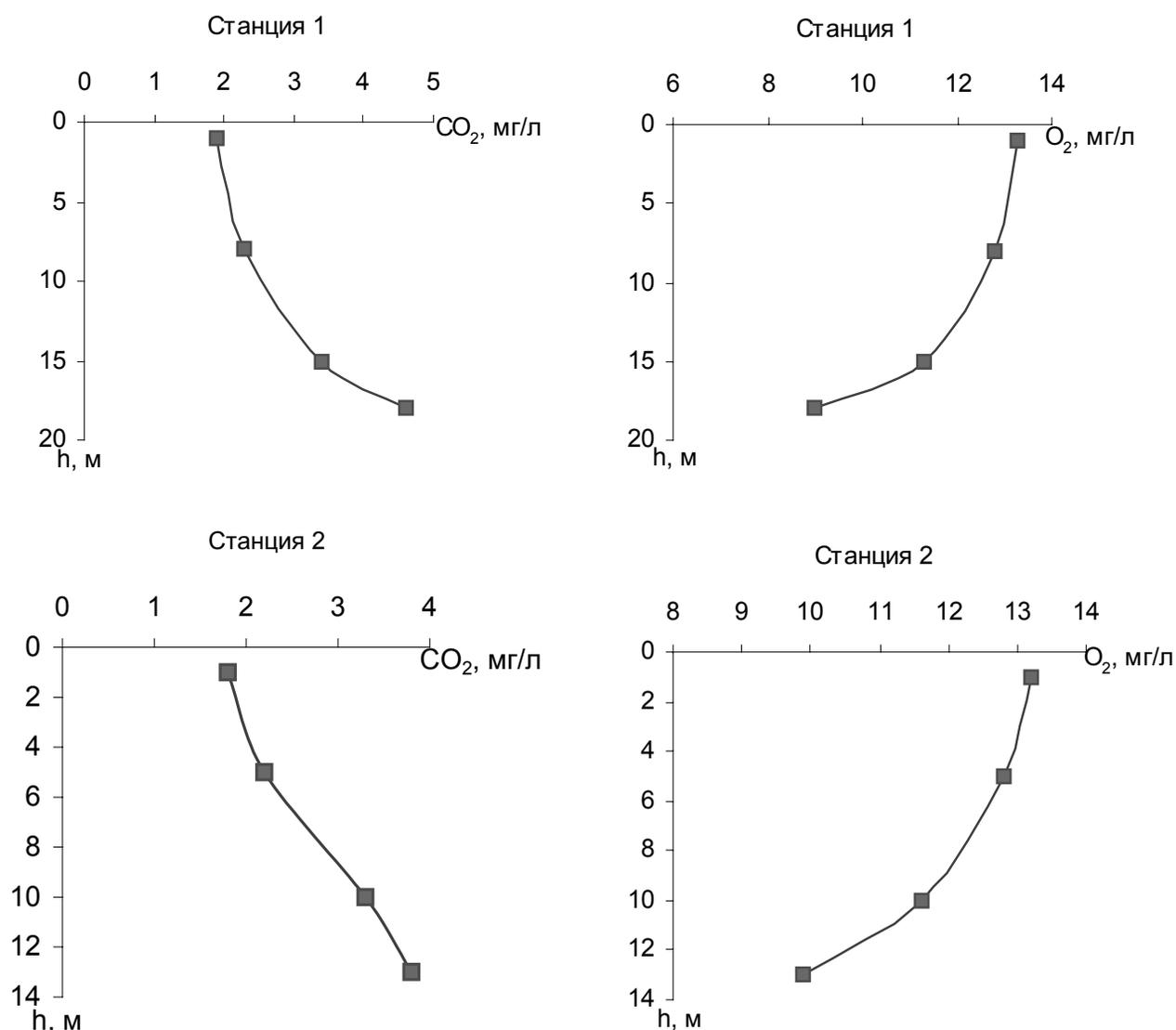


Рис. 2. Распределение CO₂ и кислорода по глубине зимой 2004 г.

ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Зоопланктон. В составе планктонной фауны оз. Пюхьярви в сентябре 1991 г. отмечено 29 видов: Calanoida – 4, Cyclopoida – 5, Cladocera – 13, Rotatoria – 7 (Рябинкин и др., 1997). Она представлена видами, обычными для карельских олиготрофных озер с включением реликта *Limnocalanus macrurus* Sars (Куликова, 2001).

В литоральной зоне озера (глубина до 3,0 м) по численности доминировали (58%) Сорерода, главным образом *Eudiaptomus graciloides* (Lilljeborg) и *Mesocyclops leuckarti* (Claus). В биомассе значительная роль принадлежала Cladocera (44%), в основном *Bosmina longispina* Leydig (табл. 6).

Таблица 6
ПОКАЗАТЕЛИ РАЗВИТИЯ ЗООПЛАНКТОНА
РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ оз. ПЮХЯРВИ

Группа	Численность		Биомасса	
	тыс. экз./м ³	%	г/м ³	%
Август 1978 г. (Ryzkov et al., 1987)				
Calanoida	2,69	15,7	0,052	31,0
Cyclopoida	9,60	56,0	0,020	12,2
Cladocera	2,05	11,9	0,093	55,3
Rotatoria	2,82	16,4	0,002	1,5
Всего	17,16	100	0,167	100
Сентябрь 1991 г.				
Calanoida	1,31	38	0,063	40
Cyclopoida	0,93	27	0,028	18
Cladocera	0,66	19	0,061	39
Rotatoria	0,55	16	0,005	3
Всего	3,46	100	0,157	100
Март 2002 г.				
Calanoida	1,28	54	0,068	66
Cyclopoida	1,00	42	0,033	31
Cladocera	0,03	1	0,003	2
Rotatoria	0,07	3	0,0002	0,2
Всего	2,38	100	0,104	100

В профундальной зоне как по численности (свыше 65%), так и по биомассе (58%) доминировали Calanoida, преобладающим видом являлся *Eudiaptomus graciloides*. Среди Cyclopoida в значительных количествах был отмечен *Mesocyclops leuckarti* (13–24% общей численности). На втором месте по биомассе стояли Cladocera (39%), преобладали *Daphnia longispina* O. F. Müller и *Bosmina longispina*. Из коловраток повсеместно обитали *Kellicotia longispina* Kellicott и *Conochilus unicornis* Rousselet.

Основную часть зимнего зоопланктона (март) представляли Сорерода, главным образом *Eudiaptomus graciloides*, а в более глубоких слоях воды – *Cyclops vicinus* Uljanin.

Средняя численность организмов в сентябре 1991 г. составляла 3,5 тыс. экз./м³ (изменялась от 0,90 в прибрежной части до 6,0 – в глубоководной), биомасса – 0,157 г/м³ (от 0,020

до 0,290 соответственно). В марте средние показатели были на уровне 2,4 тыс. экз./м³ и 0,104 г/м³.

Согласно исследованиям 1978–1980 гг. (август, июнь, май) биомасса зоопланктона в Пюхьярви составляла 0,129–0,237 г/м³, а численность организмов – 9,1–19,3 тыс. экз./м³ (Ryzkov et al., 1987). Эти значения показывают, что существенных различий с количественными данными, полученными в сентябре 1991 г. (с учетом периода наблюдений), не обнаруживается. Следует отметить, в частности, незначительное развитие среди кладоцер *Daphnia cristata* Sars и в то же время преобладание *D. longispina* O. F. Müller, что может являться в определенной мере показателем эвтрофирования водоема.

Зообентос. В составе донных биоценозов российской части оз. Пюхьярви отмечены: Oligochaeta, Bivalvia, Gastropoda, Amphipoda, Trichoptera, Ephemeroptera, Megaloptera, Hirudinea, Ostracoda, Ceratopogonidae, Chironomidae. Доминирующий комплекс образован видами, типичными для олиготрофных озер, – *Pelosclex ferox* (*Spirosperma ferox*), *Tanytarsus bathophilus*, *Monodiamesa bathyphila*, *Stictochironomus crassiforceps* (*S. rosenscholdi*), *Procladius* sp., *Monoporeia affinis*, *Pisidium* sp.

Средняя биомасса бентоса в период исследований составила 2,5 г/м² при средней численности 1156 экз./м², хотя на заиленных песках и в зарослях высшей водной растительности эти показатели достигали соответственно 8,4 г/м² и 5300 экз./м² (табл. 7).

Таблица 7
СТРУКТУРА ПРОФУНДАЛЬНОГО МАКРОБЕНТОСА
РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ оз. ПЮХЯРВИ (глубина >10 м)

Группа	Численность		Биомасса	
	экз./м ²	%	г/м ²	%
Август 1978 г. (Ryzkov et al., 1987)				
Oligochaeta	45	8,6	0,015	5,9
Mollusca	81	15,5	0,014	5,6
Amphipoda	294	56,5	0,210	83,1
Chironomidae	101	19,4	0,013	5,4
Всего	521	100	0,250	100,0
Сентябрь 1991 г. (Рябинкин и др., 1997)				
Oligochaeta	–	–	–	–
Mollusca	15	8,8	0,611	75,3
Amphipoda	29	17,1	0,063	7,8
Chironomidae	126	74,1	0,137	16,9
Всего	170	100	0,811	100
Сентябрь 2003 г.				
Oligochaeta	60	23,8	0,047	15,6
Mollusca	54	21,4	0,065	21,6
Amphipoda	34	13,5	0,087	28,9
Chironomidae	104	41,3	0,102	33,9
Всего	252	100	0,301	100

В литоральной зоне преобладали Oligochaeta (семейства Naididae), на долю которых приходилось свыше 70% численности и 60% биомассы литорального бентоса, а также поденки *Ephemera vulgata*.

В глубоководных участках озера доминирующий комплекс был образован Chironomidae (*Procladius* sp., *Stictochironomus crassiforceps* (*S. rosenscholdi*), *Polypedilum scalaenum*), Amphipoda (*Monoporeia affinis*, *Pallasea quadrispinosa*) и *Bivalvia*.

Средние количественные характеристики развития макробентоса, полученные по результатам исследований в 1991–2003 гг., почти не отличаются от более ранних (Ryzkov et al., 1987), что свидетельствует о стабильности экосистемы российской части оз. Пюхяярви.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить особенности оз. Пюхяярви как уникального объекта природы. Прежде всего, оз. Пюхяярви при значительных размерах имеет очень маленький удельный водосбор (около 3) и замедленный водообмен (около 7,5 года). Для него характерна высокая доля атмосферного питания и небольшая приточность вод с водосборной территории. Наряду с гидрологическими особенностями озера имеет и свои отличительные геохимические признаки. Так, в озере отмечена повышенная минерализация воды (около 36 мг/л), в ионном составе преобладающими анионами являются сульфаты и гидрокарбонаты (около 40%-экв. каждого в отдельности), ионы кальция (около 50%-экв.). Указанное обстоятельство

ЛИТЕРАТУРА

Иешко Е. П., Михайлова Н. В., Шевчук И. Н. Важнейшие результаты мультидисциплинарных международных проектов КарНЦ РАН // Северная Европа в XXI веке: природа, культура, экономика. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006.

Куликова Т. П. Видовой состав зоопланктона внутренних водоемов Карелии // Тр. Карельского науч. центра РАН. Серия Б. «Биология». Вып. 2. Биогеография Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 133–151.

Лозовик П. А. Северный район Ладожского озера и его притоки. Химический состав воды притоков // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 71–76.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов в гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. Л., 1984а. 33 с.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. Л., 1984б. 52 с.

Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии. Петрозаводск, 1987. 154 с.

ство является достаточно редким, на территории Карелии таких озер нет. Как следствие особенностей гидрологического режима (малый удельный водосбор, замедленный водообмен) в оз. Пюхяярви высокая доля автохтонного ОВ (осенью до 70%, зимой – до 40%). По уровню содержания $P_{\text{общ}}$ озеро соответствует больше мезотрофному типу, чем олиготрофному. Вследствие существенного новообразования ОВ в озере и накопления его в донных отложениях зимой в Пюхяярви наблюдается дефицит O_2 в придонных слоях воды. Водоем имеет весьма низкую устойчивость к органической и биогенной нагрузкам. По биологическим показателям – таксономическому составу, показателям численности и биомассы зоопланктона и макробентоса – российская часть озера в настоящее время относится к типу олиготрофных водоемов.

Указанные особенности оз. Пюхяярви требуют проведения дальнейших исследований. Прежде всего необходимо более детальное исследование формирования химического состава воды озера под действием природных и антропогенных факторов. Применение метода химического баланса и выяснение вклада атмосферных осадков, поверхностного, подземного стока, а также подстилающих пород в формирование состава воды озера в конечном итоге позволит более конкретно очертить водоохранные мероприятия этого уникального водного объекта природы.

Рябинкин А. В., Фрейндлинг А. В., Власова Л. И. Гидробиологическая характеристика озера Пюхяярви (Российская часть) // Финно-угорский мир: состояние природы и региональная стратегия защиты окружающей среды. Тез. докл. междунар. конф. (2–5 июня 1997 г.). Сыктывкар, 1997. С. 153–154.

Kukkonen M., Kiiski J., Luotonen H., Niinioja R. The plan of water and water ecosystem protection for Lake Karelian Pyhäjärvi. Joensuu, 2005. 53 p.

Luotonen H., Niinioja R., Kattunen K. et al. Transboundary Lake Karelian Pyhäjärvi on the Finnish – Russian Border Area – Assessment of the Ecological Status // M. Ruoppa & K. Kattunen (eds.). Typology and ecological classification of lakes and rivers. TemaNord 566: 2002. P. 98–101.

Niinioja R., Ahtiainen M. Water quality of Lake Pyhäjärvi (Karelia) in the 1980s // Finish fisheries research. 1987. N 8. P. 13–19.

Ryzkov L. P., Kostylev Ju. V., Polina A. V. et al. Fisheries research in the Soviet Zone of Lake Pyhäjärvi // Finish fisheries research. 1987. N 8. P. 3–12.

The geochemical Atlas of Finland. Part 1. Espoo, 1990. P. 30.

Titov A., Ieshko E., Hokkanen A., Pelkonen P. Joint ecological policy: a key element in interregional and international relation // Biosphere reserve studies. Joensuu, 1995. P. 61–63.