

Особенности химического состава воды и донных отложений малых арктических горных озер

Даувальтер В.А., Денисов Д.Б.

Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, vladimir@inep.ksc.ru

Аннотация. Для горных арктических озер (высота уреза воды от 434 до 812 м н. у. м., Хибинский щелочной массив) получены данные о химическом составе вод и донных отложений, и на их основе проведена оценка современного состояния водосборного бассейна. Исследуемые озера характеризуются олиготрофным статусом и низкой минерализацией. Воды озер относятся к гидрокарбонатному классу и имеют нейтральные величины pH (кроме оз. Каровое). Особенностью химического состава воды исследуемых озер является повышенное относительное содержание катиона K^+ , который находится на втором месте после иона Na^+ . Показано, что в оз. Тахтаръявр, расположенном на юго-западном склоне Хибинского массива, четко выражены последствия аэротехногенного загрязнения. Аккумуляция тяжелых металлов (Cu, Ni, Hg и особенно Pb) наблюдается в верхних слоях донных отложений (3-5 см) озер.

Ключевые слова: высокогорные арктические озера, Хибины, качество воды, донные отложения, тяжелые металлы.

Features of chemical composition of water and sediments of small Arctic mountain lakes

Dauvalter V.A., Denisov D.B.

Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, vladimir@inep.ksc.ru

Abstract. Data on chemical composition of waters and sediments were obtained for mountain Arctic lakes (altitude above sea level from 434 to 812 m, the Khibiny alkaline massif), the assessment of current state of a catchment basin is carried out on their basis. The studied lakes are characterized by the oligotrophic status and low mineralization. Lake waters belong to the hydrocarbonate class and have neutral pH values (except Lake Karovoye). A peculiar feature of a chemical composition of water of the studied lakes is the raised relative contents of K^+ cation, which is at the second place after Na^+ ion. Consequences of air pollution are manifested in Lake Takhtarjavr located on the southwest slope of the Khibiny massif. Accumulation of heavy metals (Cu, Ni, Hg and particularly Pb) is observed in the surface layers of lake sediments (3-5 cm).

Keywords: mountain Arctic lakes, Khibiny Mountains, water quality, sediments, heavy metals.

Малые горные арктические водоемы являются уникальным источником экологической информации о состоянии окружающей природной среды, антропогенном загрязнении, условиях формирования качества вод и широко используются в комплексном экологическом мониторинге и палеоэкологических исследованиях (Моисеенко и др., 1997; Денисов, 2012; Денисов и др., 2015). Эти озера представляют собой уникальные модельные объекты для оценки экологического состояния и степени антропогенного влияния на определенную территорию, потому что они характеризуются малой площадью водосбора, преобладанием атмосферного питания и коротким периодом открытой воды. Преимуществом исследований малых горных водоемов является возможность получения репрезентативных данных даже в результате однократного исследования.

В статье рассматриваются результаты изучения химического состава воды и донных отложений (ДО) высокогорных альпийских озер, расположенных на территории Хибинского щелочного горного массива (рис. 1). Питание исследуемых водоемов осуществляется за счет атмосферных осадков, за долгую зиму (8-9 месяцев) накапливающихся в виде снежников, иногда присутствующих на водосборе озер в течение всего года, например, на водосборе оз. Академическое. Почвенный покров на водосборах исследуемых озер выражен слабо. Растительность характеризуется преобладанием лишайников рода *Certaria*, встречаются представители семейств *Vacciniaceae*, *Surgaceae* и другие типичные растения высокогорной тундры. Склоны берегов озер крутые, с каменными осыпями, скальными выступами, трещинами. Литоральная зона водоемов



Рис. 1. Карта-схема расположения малых озер Хибинского горного массива и прилегающих территорий с указанием высоты над уровнем моря, м.

Fig. 1. Schematic map of arrangement of small lakes of the Khibiny massif and adjacent territories with the indication of altitude above sea level, m.

каменистая, которая часто переходит в чашу озера с крутыми склонами. Вода озер характеризуется малым содержанием взвешенных веществ, высокой прозрачностью и голубым цветом. Летом в озерах устанавливается температурная стратификация. Прямое антропогенное воздействие на водоемы в настоящее время не оказывается, рекреационная нагрузка также незначительна. Атмосферное питание озер определяет зависимость химического состава вод и ДО от природных особенностей водосбора и аэротехногенного загрязнения.

Качество вод исследованных озер соответствует естественно-природным водоемам Мурманской области, с низкими концентрациями биогенных элементов, общей минерализации и высоким содержанием кислорода (Кашулин и др., 2008). Некоторые основные гидрохимические показатели озер приведены в таблице 1-3. Величины pH близки к нейтральным значениям, что нетипично для озер Хибинского массива, воды которых находятся в тесном контакте с коренными щелочными горными породами, и относятся к слабощелочным и щелочным. Воды оз. Каровое по величине pH относятся к слабокислым, что характерно для вод атмосферных осадков (Даувальтер и др., 2008). Водоемы (за исключением оз. Каровое) способны противостоять кислотным выпадениям благодаря щелочному составу подстилающих горных пород, сравнительно высокой буферной емкости (больше критического значения 50 мкг-экв/л) и значительным глубинам. Это подтверждается невысокими концентрациями анионов сильных кислот SO_4^{2-} , NO_3^- и околонейтральными значениями pH. Воды исследованных озер относятся к гидрокарбонатному классу (кроме оз. Каровое) и натриевой группе. В воде оз. Каровое преобладающим анионом является сульфат-ион, минерализация воды очень низкая. Особенностью химического состава воды исследуемых озер является повышенное относительное содержание катиона K^+ , который находится на втором месте после иона Na^+ , тогда как равнинные озера Мурманской области, не получающие прямых стоков промышленных предприятий, характеризуются гидрокарбонатным классом и кальциевой группой, и катион K^+ стоит, как правило, на последнем месте среди основных катионов (Кашулин и др., 2008). По химическому составу вода оз. Каровое близка к составу атмосферных осадков, поэтому можно сделать вывод, что основное участие в питании озера принимают атмосферные осадки, главным образом, в твердом виде (снежки). Минерализация других исследованных озер также низкая; отмечается тенденция увеличения минерализации с уменьшением абсолютных отметок уреза воды в озерах ($r = -0.59$).

Таблица 1. Средние значения величины рН, содержания главных ионов и минерализации (М) воды исследуемых озер (мг/л).

Table 1. Average values of pH, the contents of the main ions and mineralization (M) of water of the studied lakes (mg).

Озеро	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	M
Тахтаръявр	6.86	0.36	0.04	2.77	0.64	6.3	1.3	0.6	11.9
Академическое	6.86	0.20	0.03	2.50	0.60	4.9	1.4	0.5	10.1
Каровое	5.91	0.15	0.03	0.82	0.25	0.5	1.5	0.4	3.7
Партомъявр	6.97	0.40	0.13	6.11	0.99	9.1	6.0	1.2	23.9
Длинное	7.07	0.47	0.07	4.45	1.35	10.6	2.6	0.7	20.3
Сердцевидное	7.28	0.56	0.07	6.33	1.74	15.5	3.1	0.6	27.9

Таблица 2. Средние содержания соединений N и P (мкг/л), цветности (°Pt), химического потребления O, органического C и Si (мг/л) в воде исследуемых озер.

Table 2. Average contents of compounds of N and P (µg/l), color (°Pt), COD_{Mn}, TOC and Si (mg/l) in water of the studied lakes.

Озеро	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}	Цветн.	XПК _{Mn}	C _{орг}	Si
Тахтаръявр	7	90	236	2	6	4	0.5	1.9	1.66
Академическое	4	44	93	н.о.	3	5	0.6	2.0	1.30
Каровое	6	2	152	1	3	5	0.6	2.0	0.37
Партомъявр	26	161	277	2	5	5	0.3	1.8	2.31
Длинное	11	65	172	1	4	7	0.5	2.0	1.45
Сердцевидное	11	87	203	1	4	5	0.4	1.9	2.38

Таблица 3. Средние содержания микроэлементов в воде исследуемых озер (мкг/л).

Table 3. The average contents of trace elements in water of the studied lakes (µg/l).

Озеро	Al	Fe	Cu	Ni	Co	Zn	Mn	Sr	Pb
Тахтаръявр	24	7	0.6	0.6	0.3	1.8	5	43	0.10
Академическое	19	5	0.7	0.5	0.1	0.9	0.6	3	н.о.
Каровое	133	28	0.2	0.6	0.3	2.3	3	32	0.30
Партомъявр	35	18	3.4	2.3	0.2	3.6	2	29	0.30
Длинное	45	9	0.9	0.5	0.2	2.2	1	64	0.28
Сердцевидное	56	10	0.4	0.5	0.2	1.9	н.о.	71	0.30

По содержанию биогенных элементов исследуемые водоемы относятся к олиготрофным с признаками мезотрофного. Содержание общего фосфора соответствует олиготрофному статусу, а общего азота в воде озер Тахтаръявр и Партомъявр – нижней границе мезотрофного (Романенко и др., 1990). Наибольшие содержания соединений азота в озерах на абсолютных отметках менее 500 м связаны, скорее всего, с близким расположением рудников АО «Апатит» и выбросами в атмосферу продуктов взрывов при добыче апатитонепелиновых руд. Повышенные содержания соединений азота в воде оз. Тахтаръявр связаны, вероятно, с их поступлением с производственной пылью Второй апатитонепелиновой обогатительной фабрики (АНОФ-II) и его хвостохранилища.

Содержание приоритетных загрязнителей азротехногенного происхождения (Cu, Ni) в воде соответствует самому высокому I классу качества вод (Романенко и др., 1990). Максимальные содержания Cu, Ni и Zn отмечены в воде оз. Партомъявр, находящегося ближе всех из исследуемых озер к комбинату «Североникель», выбросы которого беспрепятственно достигают водосбора озера. В других озерах концентрации ТМ меньше средних значений для малых озер восточной (фоновой) части Мурманской области (Kashulin et al., 2017). Хибинский массив является препятствием для атмосферных выбросов металлургического комбината, и они не достигают водосборов исследуемых озер. Концентрация элементов, являющихся загрязнителями среды в результате деятельности апатитонепелинового производства (Al и Sr), находится в пределах диапазона значений, характерных

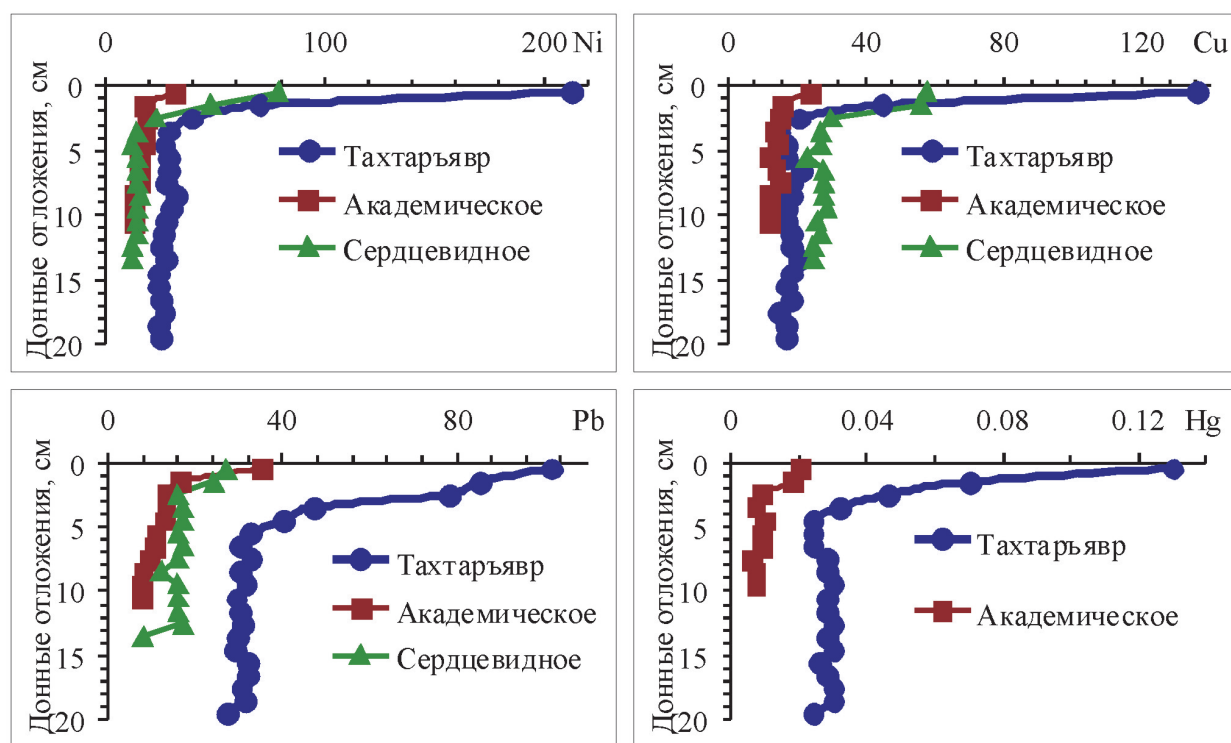


Рис. 2. Вертикальное распределение ТМ в ДО исследуемых озер (мкг/г сухого веса).

Fig. 2. Vertical distribution of heavy metals in sediments of the studied lakes ($\mu\text{g/g}$ of dry weight).

для других малых озер Хибинского горного массива, куда не поступают стоки рудников (Кашулин и др., 2008). Наибольшие содержания Al и Fe зафиксированы оз. Каровое, что связано с низкими величинами pH в воде, при которых эти металлы приобретают большую миграционную способность (Никаноров, 2001). Это подтверждает также высокие отрицательные значения коэффициента корреляции величин pH с содержаниями Al и Fe ($r = -0.79$ и -0.78 соответственно). Наибольшие содержания Sg (также как и соединений азота) отмечены в воде озер, близко расположенных к предприятиям АО «Апатит», – Сердцевидное, Длинное и Тахтаръявр.

Характер распределения содержания ТМ в ДО свидетельствует о крайне низких скоростях осадконакопления в озерах (рис. 2). С учетом данных (Денисов, 2012; Даувальтер и др., 2015), особенностей рельефа и малой площади водосбора, а также в связи с незначительным поступлением аллохтонного вещества с территории водосборов, скорость накопления ДО может составлять доли мм в год. Аккумуляция некоторых ТМ (Cu, Ni, Hg и особенно Pb) наблюдается начиная с верхних слоев ДО (3-5 см) озер Тахтаръявр и Сердцевидное, что объясняется глобальным загрязнением атмосферы северо-запада Европы этими элементами в XIX–XX вв. Резкое увеличение содержания ТМ в поверхностном слое 0-2 см является результатом деятельности крупных металлургических комбинатов в Мурманской области в XX в. В оз. Академическое заметное увеличение содержания ТМ отмечается только в поверхностном 1-см слое ДО, что говорит о незначительной скорости осадконакопления.

Коэффициенты загрязнения (C_f – отношение концентрации элемента в поверхностном 1-см слое ДО к содержанию этого элемента в самой нижней части колонки, определяемого как фоновое, Hakanson, 1980) для Cu и Ni наибольшие в оз. Тахтаръявр, и они относятся к высоким по классификации Л. Хокансона. В этом озере зафиксировано также максимальное загрязнение для Hg, значительное по классификации Л.Хокансона. Максимальная величина C_f по Pb (значительное по классификации Л.Хокансона) отмечена в оз. Академическое, хотя максимальная концентрация этого высокотоксичного ТМ зафиксирована в оз. Тахтаръявр (рис. 2, табл. 4). Наибольшее значение степени загрязнения C_d (пограничное между значительным и высоким по классификации Л.Хокансона), рас-

считанной как сумма коэффициентов загрязнения восьми ТМ (Cu, Ni, Co, Zn, Cd, Pb, Hg и As), отмечено в оз. Тахтаръявр, расположенном на юго-западном склоне Хибинского массива, до которого беспрепятственно доходит аэротехногенное загрязнение комбината «Североникель» и АНОФ-П. Озера Академическое и Сердцевидное также подвержены загрязнению, но меньшему, чем оз. Тахтаръявр, о чем свидетельствуют значения степени загрязнения, находящиеся на границе между умеренным и значительным согласно классификации Л.Хокансона.

Таблица 4. Концентрации ТМ в поверхностных (0-1 см) и фоновых слоях (вторая строка) ДО, значения коэффициентов (C_f) и степени (C_d) загрязнения исследуемых озер.

Table 4. Concentration of heavy metals in superficial (0-1 cm) and background layers (the second line) of sediments, values of factor (C_f) and degree (C_d) of contamination of the studied lakes.

Озеро	Слой, см	ППП	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg	C_d
Тахтаръявр	0-1	15.16	136	213	270	19.8	0.506	102	11.6	0.130	–
	19-20	16.89	17	25	390	16.6	0.196	27	9.62	0.024	–
	C_f		8.1	8.4	0.7	1.2	2.6	3.7	1.2	5.4	31.4
Академическое	0-1	24.68	24.1	31.6	103	5.44	0.94	35.1	3.32	0.020	
	19-20	24.97	12.0	12.5	51	5.16	0.58	7.3	2.37	0.007	
	C_f		2.0	2.5	2.0	1.1	1.6	4.8	1.4	2.9	18.3
Сердцевидное	0-1	22.90	58	79	122	7.0	1.19	27	–	–	–
	13-14	16.70	25	12	121	5.0	1.19	8	–	–	–
	C_f		2.3	6.6	1.0	1.4	1.0	3.4	–	–	15.7

Работа выполнена в рамках темы НИР №0226-2019-0045 и частично поддержана из средств гранта РФФИ (18-05-60125).

Литература

1. Даувальтер В.А., Даувальтер М.В., Салтан Н.В., Семенов Е.Н. Химический состав атмосферных выпадений в зоне влияния комбината «Североникель» // *Геохимия*. 2008. № 10. С. 1131–1136.
2. Даувальтер В.А., Кашулин Н.А., Денисов Д.Б. Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия // *Труды Карельского НЦ РАН*. 2015. № 9. С. 62–75.
3. Денисов Д. Б. Реконструкция развития экосистемы малого горного субарктического водоема за последние 900 лет (на примере оз. Академическое, Хибин, Кольский полуостров) // *Труды Кольского НЦ РАН. «Прикладная экология Севера»*. 2012. Вып. 1. С. 126–147.
4. Денисов Д.Б., Валькова С.А., Терентьев П.М., Черепанов А.А. Экологические особенности малых ледниковых субарктических озер (Хибинский горный массив, Кольский полуостров) // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2015. № 2. С. 40–52.
5. Кашулин Н.А., Денисов Д.Б., Сандимиров С.С., Даувальтер В.А., Кашулина Т.Г., Малиновский Д.Н., Вандыш О.И., Ильяшук Б.П., Кудрявцева Л.П. Антропогенные изменения водных систем Хибинского горного массива (Мурманская область). В 2 т. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2008. Т. 1. 250 с., Т. 2. 282 с.
6. Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Каган Л.Я. Горные озера как индикаторы загрязнения воздуха // *Водные ресурсы*. 1997. Т. 24. № 5. С. 600–608.
7. Никаноров А.М. *Гидрохимия*. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 444 с.
8. Романенко В.Д., Оксикю О.П., Жукинский В.Н., Стольберг Ф.В., Лаврик В.И. Экологическая оценка воздействия гидротехнического строительства на водные объекты. Киев: *Наук. думка*. 1990. 256 с.
9. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // *Water Res.* 1980. V. 14. P. 975–1001.
10. Kashulin N.A., Dauvalter V.A., Denisov D.B., Valkova S.A., Vandysh O.I., Terentjev P.M., Kashulin A.N. Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk Region, Russia // *J. Environ. Science and Health, Part A*. 2017. V. 52, No. 9. P. 921–929.