

УДК 628.81

ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД МАЛЫХ ОЗЕР КОЛЬСКОГО СЕВЕРА ВСЛЕДСТВИЕ СНИЖЕНИЯ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

© 2014 г. Член-корреспондент РАН Т. И. Моисеенко, М. М. Базова, Л. Е. Ефимова

Поступило 25.10.2013 г.

DOI: 10.7868/S0869565214130210

Проблема закисления вод малых озер резко обозначилась в середине прошлого века в Северной Америке и в Европе как следствие выбросов в атмосферу кислотообразующих газов, главным образом диоксида серы SO_2 . Снижение выбросов диоксида серы в развитых странах начало происходить с середины 1980-х годов. Закисленные озера во многих регионах стали частично восстанавливаться от закисления при уменьшении эмиссии SO_2 [1–3].

В России в начале 1990-х годов было выявлено закисление вод в ряде регионов: в Мурманской области, Карелии, Архангельской и Вологодской областях [4]. Особенно заметно закисление вод проявилось на Кольском Севере, где функционируют крупные медно-никелевые плавильные производства.

Под термином “восстановление” по отношению к закисленным озерам и рекам понимается увеличение pH и щелочности вод а также, соответственно, восстановление кислотонейтрализующей способности (ANC) вод [5]. Однако изменения химического состава вод при долговременных наблюдениях не всегда однозначны и пропорциональны снижению потока сульфатов. Отмечаются три сценария развития ситуации пролонгированного изменения химического состава вод [2]: 1) развивается дальнейшее закисление вод, 2) pH и щелочность не изменяются; 3) происходит восстановление буферных свойств вод.

Целью работы было выявить основные тенденции изменения химического состава вод малых озер за 20-летний период в результате снижения выбросов диоксида серы SO_2 , никеля Ni и меди Cu, дать оценку восстановления буферных свойств озер.

В основу работы легло обобщение результатов гидрохимического обследования (1990, 1995, 2000,

2005 и 2010 гг.) 75 озер на Кольском Севере, которые расположены на различном удалении от комбинатов концерна “Никель”. Химический состав вод определяли общепринятыми методами [6]. Результаты аналитических измерений проходили ежегодную интеркалибровку в рамках международного проекта ICP-Water.

Содержание основных ионов минерализации представлено в микроэквивалентах (мкэкв/л). Показатель ANC рассчитывался по следующей формуле:

$$\text{ANC} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^{+}] + \\ + [\text{K}^{+}] + [\text{NH}_4^{+}] - [\text{SO}_4^{2-}] - [\text{NO}_3^{-}] - [\text{Cl}^{-}].$$

Учитывая высокую вариабельность химического состава вод малых озер региона, озера сгруппировали по шести субрегионам в зависимости от удаленности от плавильных производств, геологических и ландшафтных условий формирования химического состава вод (табл. 1). Представлены медианные значения по годам исследования.

Сульфаты-анионы, основные катионы и ANC. Определяющую роль в процессах закисления или восстановления вод озер Кольского региона играют поступление с водосбора основных катионов (BC), а также удаленность от источника загрязнения. Общей характеристикой изменений химического состава вод малых озер Кольского Севера за прошедшие 20 лет является снижение содержания сульфатов-анионов как следствие сокращения эмиссии диоксида серы от кольских медно-никелевых производств. В результате сокращения выпадения сульфатов в 46% исследованных озер происходит восстановление ANC; в 30% озер изменения в химическом составе вод не прослеживаются, тогда как в 24% продолжают развиваться процессы закисления.

В локальной зоне влияния комбинатов (менее 30 км) формирование химического состава вод определяется влиянием пылевой эмиссии. При растворении пылевых частиц в воду поступают основные катионы, способствующие ее подщелачиванию.

Таблица 1. Медианные (50%) значения показателей химического состава вод малых озер в различных субрегионах Кольского Севера за 1990–2010 гг.

Год	pH	BC	Alk	SO ₄	N _{tot}	P _{tot}	POB	ANC	Al	Cu	Ni
		мКЭКВ/л							мкг/л		
I – зона вокруг плавилен, <i>n</i> = 7											
1990	6.76	381	124	124	49	3.0	3.5	89	76	9.5	24.5
1995	6.74	328	112	100	91	3.0	3.7	128	27	1.5	8.3
2000	6.92	282	113	105	128	5.0	3.8	140	30	2.5	7.5
2005	6.50	274	121	70	106	5.5	3.6	128	27	5.0	5.6
2010	6.79	361	146	102	162	5.0	5.0	143	22	6.2	8.4
II – северная тайга и лесотундра (основные породы), <i>n</i> = 28											
1990	6.63	257	93	77	152	8.0	3.2	129	64	1.3	1.0
1995	6.70	261	125	62	164	4.0	5.9	189	33	0.7	0.7
2000	6.84	261	106	52	171	3.0	6.7	178	45	0.7	0.9
2005	6.60	263	124	52	220	6.0	6.5	187	52	0.6	0.9
2010	6.67	264	140	48	213	5.0	6.3	213	29	1.5	3.5
III – тайга (щелочные горные массивы), <i>n</i> = 15											
1990	7.16	435	328	54	180	5.0	5.2	334	—	—	—
1995	7.08	399	295	55	203	7.0	7.0	326	28	0.6	0.4
2000	7.18	411	318	52	228	5.0	6.3	355	55	0.7	0.6
2005	6.74	410	286	43	319	11.0	8.2	312	55	0.6	0.7
2010	6.98	473	330	45	261	14.0	8.5	402	56	0.8	0.6
IV – северо-восточная тундра (гранитные формации), <i>n</i> = 9											
1990	6.31	269	83	127	132	0	3.1	–9	18	2.0	0.0
1995	6.46	244	69	45	148	6.0	3.8	65	27	0.5	0.2
2000	6.64	253	74	42	161	5.0	4.2	88	34	0.4	0.2
2005	6.15	277	48	39	246	11.0	5.2	72	41	0.5	0.7
2010	6.29	263	50	35	244	12.0	4.1	69	68	0.6	0.8
V – тайга (кварцевые пески), <i>n</i> = 5											
1990	4.55	137	0	79	210	5.0	8.7	–14	—	—	—
1995	5.29	97	0	42	230	6.0	4.9	21	18	0.9	0.7
2000	5.67	93	0	40	259	3.0	6.8	18	70	0.7	0.7
2005	5.50	86	0	43	230	7.0	2.6	10	35	0.7	0.8
2010	5.44	63	0	26	257	11.0	4.8	13	38	0.6	0.7
VI – лесные и заболоченные ландшафты, <i>n</i> = 11											
1995	5.54	179	40	40	154	29.9	11.3	83	42	1.6	1.9
2000	5.49	153	33	24	270	55.3	12.2	82	173	1.5	1.5
2005	5.12	168	11	27	342	68.3	14.7	21	277	1.2	2.1
2010	5.54	136	29	20	239	67.5	14.6	80	174	1.3	1.9

чиванию. На удалении от комбинатов (30–100 км) основные породы (базальты, габбро и др.), а также нефелиновые сиениты, слагающие Хибинский щелочной массив, способствуют нейтрализации кислотных выпадений. В то же время в пределах этой зоны на возвышенностях, представ-

ленных обнажениями гнейсовых пород (Чуна, Волчи и Сальные тундры), сохраняются закисленные озера.

В зонах, расположенных на удалении более 100 км от медно-никелевых предприятий, направленность процессов неоднозначна. В прибреж-

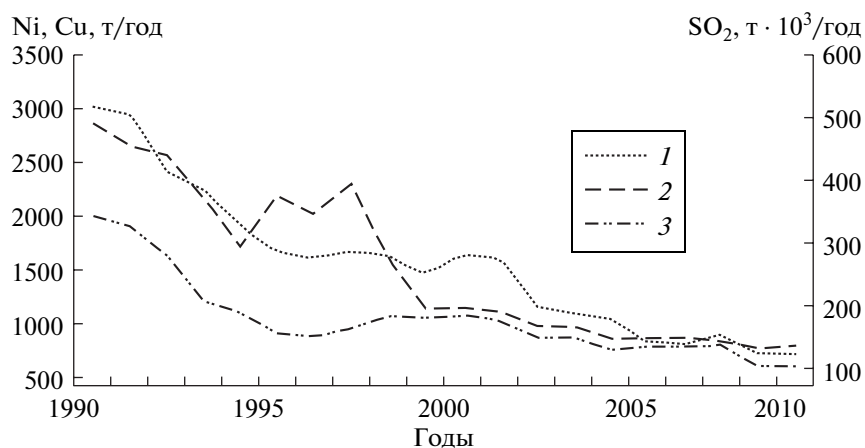


Рис. 1. Эмиссия никеля и меди от кольских плавильных.
1 – Ni, 2 – Cu, 3 – SO₂.

ных тундровых озерах, приуроченных к обнажениям гранитных пород, для большей части озер отчетливо обозначилось восстановление щелочности, pH и ANC. Однако в некоторых лесных озерах, подстилающие породы которых представлены кварцевыми песками, происходит дальнейшее снижение концентрации катионов, показателей pH и ANC.

Биогенные элементы и эффекты повышения температуры. Поверхностные воды Кольского Севера характеризуются малым содержанием биогенных элементов вследствие низких температур, преимущественного атмосферного питания и тонкого почвенного слоя. За рассматриваемый период в исследуемых озерах отчетливо прослеживается тенденция нарастания концентраций общего азота и общего фосфора (N_{tot} и P_{tot}), табл. 1. Повышение содержания биогенных элементов характерно как для урбанизированных регионов в пределах 30 километровой зоны вокруг плавильных производств, так и для отдаленных тундровых и особенно заболоченных массивов. По данным Грузы [7] на Северо-Западе России с 1970 по 2010 г. температура приземного слоя воздуха повышалась каждые 10 лет на 0.53°C, т.е. за исследуемый нами период она поднялась на 1.06°C. Повышение содержания биогенных элементов может свидетельствовать об ускорении продукционных процессов и повышении трофического статуса озер под действием потепления климата в исследуемый период.

Растворенное органическое вещество (РОВ). Феномен увеличения содержания РОВ в ряде водных систем Европы и Северной Америки в последние десятилетия подтверждается рядом работ [1–4, 8, 9]. Этот феномен наблюдается и на Кольском Севере, особенно ярко – в лесных и заболоченных субрегионах, что согласуется с литературными данными. Ряд ученых [2] объясняют повышение содержания РОВ снижением потока сильных

кислот и возвратом химического состава вод к природным значениям этого показателя. На Кольском Севере повышение РОВ отмечается как для исследованной совокупности озер, так и для озер отдельных субрегионов. Исключение составляют озера в субрегионах IV и V, водосборы которых сложены гранитами и кварцевыми песками. В этих субрегионах содержание РОВ или мало варьируется, или снижается, что закономерно при прогрессирующем закислении вод.

Следует подчеркнуть, что наблюдается сопряженное нарастание по годам и субрегионам содержания РОВ и биогенных элементов. Линейный вид и довольно тесный характер связи имеют зависимости между РОВ и P_{tot} ($r = 0.68$, $n = 29$), между РОВ и N_{tot} ($r = 0.60$, $n = 29$).

Это может быть обусловлено глобальным потеплением, которое доказано в работе [7] для Кольского Севера, и стимулированием эвтрофирования озер, которое приводит к продуцированию органических веществ. Повышение содержания РОВ в воде озер Кольского Севера может быть обусловлено двумя механизмами: снижением техногенного потока серы, которое приводит к восстановлению содержания органического вещества, и повышением трофического статуса озера вследствие регионального повышения температуры в северных регионах.

Микроэлементы. Эмиссия никеля и меди от кольских медно-никелевых производств снижается (рис. 1). Наиболее высокие исходные концентрации никеля и меди отмечены в воде озер, расположенных в 30-километровой зоне вокруг производств (табл. 1). В этой зоне наблюдается также снижение их концентраций за рассматриваемые 20 лет. В остальных субрегионах значения содержания этих элементов близки к региональным значениям [10].

Наиболее высокие концентрации Al существуют в антропогенно закисленных озерах и озерах заболоченных водосборов (VI) вследствие того, что Al активно выщелачивается кислотными осадками и природными органическими кислотами.

Таким образом, ретроспективный анализ изменения химического состава вод озер позволил установить, что в последние два десятилетия в большинстве озер наметились позитивные тенденции изменения химического состава вод. Эти тенденции проявились в снижении концентрации сульфатов в воде исследуемых озер и увеличении кислотнейтрализующей способности их вод. В то же время в озерах, водосборы которых сложены уязвимыми к кислотным выпадениям породами, прогрессирует закисление вод. Поэтому, несмотря на значительное уменьшение выбросов в атмосферу оксидов серы и металлов, восстановление химического состава вод (точнее, возврата к прежнему природному состоянию) не наблюдается. Региональной тенденцией изменения химического состава вод является нарастание содержания POB , N_{tot} и P_{tot} за последнее 20-летие, что может быть связано с потеплением климата в регионе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-05-00664).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Driscoll C.T., Driscoll K.M., Roy K.M., et al. // Environ. Sci. and Tech. 2003. V. 37. P. 2036–2042.
2. Monteith D.T., Stoddard J.L., Evans C.D., et al. // Nature. 2007. V. 450. P. 537–539.
3. Stoddard J.L., Jeffries D.S., Lukewille A., et al. // Nature. 1999. V. 401. P. 575–578.
4. Моисеенко Т.И. Закисление вод: факторы, механизмы и экологические последствия. М.: Наука, 2003. 276 с.
5. Skjelkvale B.L., Stoddard J.L., Andersen T. // Water, Air and Soil Pollut. 2001. V. 130. P. 787–792.
6. Intercomparison 1024: pH, Cond, HCO_3 , $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$, Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni, and Zn. 2010. International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Acidification of Rivers and Lakes. Repts Norweg. Inst. Water Res. № 6029. Oslo, 2010. 75 p.
7. Груза Г.В., Ранькова Э.А. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2012. 194 с.
8. Evans C.D., Monteith D.T., Reynolds B., et al. // Sci. Tot. Environ. 2008. V. 404. P. 316–325.
9. Clark J.M., Bottrell S.H., Evans C.D., et al. // AMBIO. 2013. V. 13. P. 2768–2775.
10. Moiseenko, T.I. // Sci. Tot. Environ. 1999. V. 236. P. 19–39.