

УДК 628.81

ОСОБЕННОСТИ ЭВТРОФИРОВАНИЯ АРКТИЧЕСКИХ ОЗЕР ВСЛЕДСТВИЕ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

М. М. Базова, Т. И. Моисеенко

*Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН,
ул. Косыгина д. 19, 119330, г. Москва, Россия, mm.bazova@yandex.ru*

Представлен анализ проблемы эвтрофирования водных объектов, как глобального процесса. Показаны объемы нарастающего использования азота и фосфора в планетарном масштабе, рассеивание которого в комплексе с потеплением климата приводит к повышению содержаний биогенных веществ в озерах. Выявлена тенденция нарастания содержаний азота и фосфора, а также органических веществ в водах озер даже в случае отсутствия непосредственного антропогенного воздействия. Доказано, что в арктических регионах основное влияние на увеличение содержаний биогенных веществ и трофического статуса озер оказывает потепление климата.

Ключевые слова: эвтрофирование; биогенные элементы; потоки фосфора; растворенное органическое вещество; трофический статус.

FEATURES OF ARCTIC LAKES EUTROPHICATION DUE TO CLIMATE WARMING

M. M. Bazova, T. I. Moiseenko

*Vernadsky Institute Geochemistry and Analytical Chemistry Russian Academy of Sciences,
Kosygina str.19, Moscow, 119991, Russia, mm.bzova@yandex.ru*

An analysis of the problem of eutrophication of water bodies as a global process is presented. The volumes of increasing use of nitrogen and phosphorus on a planetary scale are shown, the dispersion of which, in combination with climate warming, leads to an increase in the content of nutrients in lakes. A tendency has been revealed for an increase in the contents of nitrogen and phosphorus, as well as organic matter in lake waters, even in the absence of anthropogenic impact on the lakes. It has been proven that in the Arctic regions the main influence on the increase in the content of nutrients and the trophic status of lakes is climate warming.

Keywords: eutrophication; nutrients; phosphorus fluxes; dissolved organic matter; trophic status.

Проблема эвтрофирования водных объектов остро обозначилась в середине прошлого века и сохраняет свою актуальность в настоящее время. Развитие процесса обусловлено неконтролируемым поступлением азота и фосфора в биосферу: рассеиванием в глобальном масштабе, внесением на

поля в виде удобрений, поступлением с хозяйственно-бытовыми стоками и стоками животноводческих ферм. Общий сток реактивного фосфора в океаны, по оценкам ученых, увеличился в 9-10 раз по сравнению с доиндустриальным периодом [1]. Состояние тысяч озер, устьев водохранилищ и водно-болотных угодий по всему миру ухудшается из-за повышения уровня биогенных веществ в воде, вызывающих изменения в экологической структуре и функциях водных экосистем объектов [2, 3].

В литературе появляется все больше свидетельств, указывающих на влияние сопутствующего потепления климата, которое приводит к изменчивости химического состава вод и эвтрофированию водоемов [4]. В крупных озерах Америки обозначился процесс олиготрофикации [5], как и в крупных озерах России — Ладоге и Онеге [6].

Основные работы по предотвращению эвтрофирования водных объектов направлены на ограничения поступления биогенных веществ с точечными или диффузными источниками загрязнения. В то же время не представляется возможным ограничить влияние глобального обогащения биосферы фосфором и азотом, а также влияние потепления климата на биогеохимические циклы. Доказанными феноменами влияния потепления климата является повышение содержаний фосфора и азота, которому сопутствует увеличение органического вещества в водах [7]. Многолетние исследования озер Северной Америки показали повышение трофического статуса озер даже в случае отсутствия каких-либо антропогенных источников загрязнения. В отчетах АМАР [8] проблема повышения трофического статуса озер не рассматривается. На многочисленных конференциях, связанных с исследованиями арктического бассейна, вопрос об особенностях эвтрофирования вод высоких широт не выносится на обсуждение даже в связи с потеплением климата.

Исходными материалами послужила гидрохимическая база данных по малым озерам Кольского Севера за (1990, 1995, 2000, 2010, 2014 и 2018 гг.). На рисунке 1 приведена картосхема региона со схемой точек исследования. Изученные озера расположены в тундровой (n=15), лесотундровой (n=21) и северо-таежной зонах (n=32). Данные получены на основе методов, используемых в международной практике по программе ICP-Water, которые выполнялись по единым методикам в лабораториях Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (ИППЭС КНЦ РАН), который ежегодно принимал участие в международных интеркалибрациях. Более подробно методы исследований изложены в работе [9]. Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием компьютерной программы «Statistica 10».

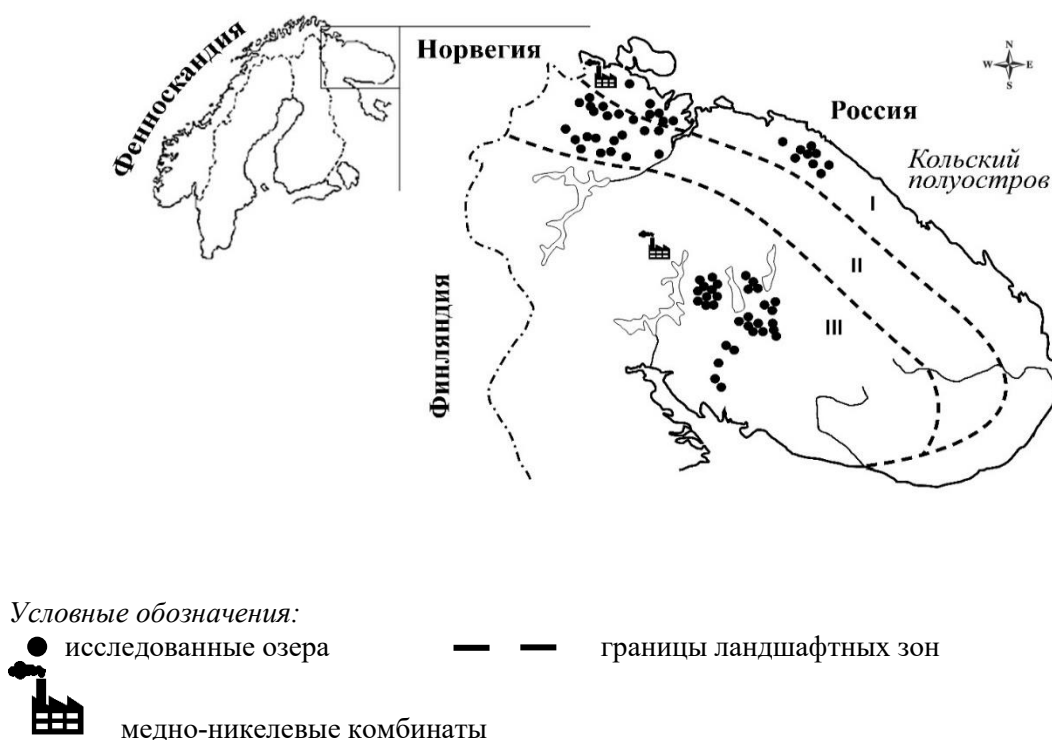


Рис. 1. Картосхема точек исследованных озер Кольского региона: I – тундровая, II – лесотундровая, III – северо-таежная зоны.

В таблице представлены содержания биогенных элементов, растворенного органического вещества, среднемесячная температура и среднемесячное количество осадков в выделенных ландшафтных зонах (тундра, лесотундра и северная тайга) за 2 периода (1990-2000 гг. и 2010-2018 гг.). Динамика среднегодовой температуры приземного слоя воздуха за два периода (1990-2000 гг.) и (2010-2018 гг.) в разных ландшафтных зонах показала увеличение, как по медианным, так и по максимальным значениям [10]. В северо-западной и северо-восточной частях региона (тундра) за рассматриваемый период среднегодовая температура воздуха увеличилась на 1,1 °C, по максимальным значениям на 4,3 °C. Среднегодовая температура в центральной части региона (лесотундра) к 2010-2018 гг. увеличилась на 1,1 °C, по максимальным на 3,1 °C. В юго-восточной части региона (северная тайга) среднегодовая температура приземного слоя воздуха к 2010-2018 гг. по сравнению с 1990-2000 гг. увеличилась на 1,2 °C, по максимальным значениям на 1,7 °C. В воде озер, расположенных в тундровой зоне содержания растворенного органического вещества (DOC) достоверно увеличились по средним значениям ($t = +2.01$, $p < 0.05$) в период с 2010 по 2018 гг. Содержания N_{tot} ($t = +3.00$, $p < 0.01$) и P_{tot} ($t = +2.26$, $p < 0.05$) в воде озер достоверно увеличились к 2010-2018 гг, по сравнению с периодом 1990-2000 гг. В озерах лесотундровой зоны содержания общего азота (N_{tot}) и общего фосфора (P_{tot}) ($t = +3.22$, $p < 0.01$) достоверно

увеличились к 2010-2018 гг. В воде озер северо-таежной зоны содержания N_{tot} ($t = +2.04$, $p < 0.05$) и P_{tot} ($t = +3.17$, $p < 0.01$), достоверно увеличились к 2010-2018 гг., по сравнению с периодом 1990-2000 гг., концентрации Si достоверно снизились ($t = -3.74$, $p < 0.001$).

К 2010-2018 гг. по сравнению с периодом 1990-2000 гг. произошло снижение количества озер с общей концентрацией фосфора < 10 мкгР/л (рисунок 2), особенно отчетливо это проявилось в лесотундровой и таежной зонах, что скорее всего связано с повышением температуры воздуха в вегетационный период, в большей степени по минимальным и максимальным значениям (таблица).

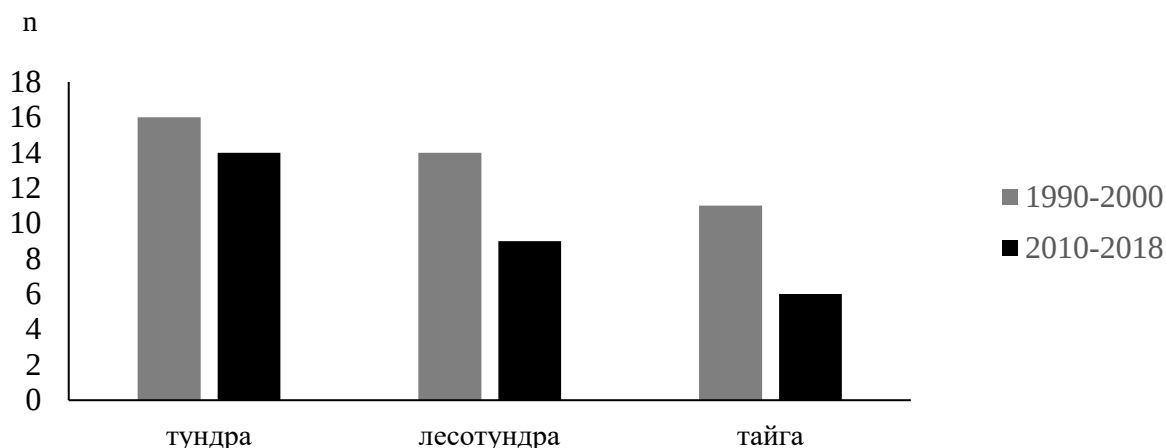


Рис. 2. Количество озер (n) с концентрацией $P_{tot} < 10$ мкгР/л в тундре, лесотундре и тайге в различные периоды: 1990-2000 гг. и 2010-2018 гг.

В последнее столетие остро обозначилась проблема эвтрофирования водоемов вследствие неконтролируемого поступления огромного количества биогенных элементов и органических веществ в биотических круговорот. Влияние потепления климата на фоне глобального рассеивания фосфора могут затронуть и отдаленные озера, включая арктические регионы. Для всей площади водосборных бассейнов исследованных озер на Кольском Севере характерно отсутствие близлежащих крупных населенных пунктов и промышленных производств, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. Таким образом доказано, что потепление климата оказывает влияние на повышение трофического статуса арктических удаленных озер.

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 22-17-00061.

Содержание общего азота (N_{tot}), общего фосфора (P_{tot}), кремния (Si), растворенного органического вещества (DOC), среднемесячной температуры приземного слоя воздуха в летне-осенний период (июнь-сентябрь) (T) (в числителе – среднее значение и среднеквадратичное отклонение, в знаменателе – пределы содержания)

Параметр	Тундра		T	Лесотундра		t	Северная тайга		t
	1	2	P	1	2	p	1	2	p
T	8.9±1.9	10.5±2.1	+2.65	10.5±2.5	11.6±2.6	+2.88	11.2±2.3	12.4±2.5	+3.14
$^{\circ}\text{C}$	4.0-12.3	5.3-16.6	<0.05	2.5-15.7	6.4-18.8	<0.01	4.1-16.2	7.2-17.9	<0.01
DOC	5.3±2.3	5.8±1.8	+2.01	6.7±5.7	6.8±4.0	–	6.9±2.1	7.0±4.1	–
мгС/л	2.8-10.9	2.7-9.9	<0.05	1.6-16.8	3.8-16.5	–	2.1-14.5	2.2-17.3	–
Si	1.5±0.9	1.3±0.8	–	2.3±1.8	1.3±1.7	–	2.0±1.4	1.6±1.1	-3.74
мг/л	0.09-3.8	0.04-3.5	–	0.03-7.1	0.04-8.5	–	0.1-5.2	0.04-4.1	<0.001
N_{tot}	186±75	237±90	+3.00	245±122	350±163	+3.22	218±63	238±79	+2.04
мкгN/л	75-470	70-503	<0.01	57-477	117-593	<0.01	70-324	110-381	<0.05
P_{tot}	7±4	10±9	+2.26	10±11	20±21	+2.04	8±4	11±5	+3.17
мкгP/л	2-20	2-65	<0.05	1-54	4-93	<0.05	2-20	3-26	<0.01

Примечания. t – критерий Стьюдента, p – уровень значимости: – тренд недостоверный. * 1 – 1990-2000, 2 – 2010-2018

Библиографические ссылки

1. *Abid A. A., Gill S. S.* Eutrophication: Causes, Consequences and Control. Volume 2. Springer Dordrecht Heidelberg London New York. 2014. 262 p.
2. *Henderson-Sellers B., Markland, H. R.* Decaying Lakes. The Origin and Control of Cultural Eutrophication. 1990. L.: Gidrometeoizdat. 280 p.
3. *Lepori F., Roberts. J. J.* Effects of internal phosphorus loadings and food-web structure on the recovery of a deep lake from eutrophication. // J. Great Lakes Res. 2017. V.43. № 2.
4. *Моисеенко Т. И., Базова М. М., Дину М. И., Гашкина Н. А., Кудрявцева Л. П.* Изменение геохимии вод суши в условиях потепления климата и снижения выпадений кислот: восстановление или эволюция озер? // Геохимия. 2022. Т. 67. № 2. С. 668-685.
5. Great Lake Ecosystem Report. 2007. Available online: <http://www.epa.gov/glnpo/rptcong>. (accessed on 9 March 2006).
6. *Moiseenko T. I., Sharov A.* Large Russian lakes Ladoga, Onega, and Imandra under strong pollution and in the period of revitalization: a review // Geosciences. 2019. V.9. № 12. P.492.
7. *Moiseenko T. I., Bazova M. M., Gashkina N. A.* Development of Lake from Acidification to Eutrophication in the Arctic Region under Reduced Acid Deposition and Climate Warming // Water. 2022. V.14. 3467.
8. CliC/AMAP/IASC. The Arctic Freshwater System in a Changing Climate. WCRP Climate and Cryosphere (CliC) Project, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). 2016. International Arctic Science Committee (IASC)
9. *Моисеенко Т. И., Базова М. М., Льюмменс Е. О.* Биогеохимические изменения арктических озер в условиях потепления климата: региональные особенности // Геохимия. 2023. Т. 68. № 4. С. 409-423.
10. Архив погоды: Мурманская область. 2019. Справочно-информационный портал «Погода и климат» (<http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php?id=ru®ion=51>).