
ПРОБЛЕМЫ ВОД СУШИ

УДК 628.81

ГЛОБАЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ЭВТРОФИРОВАНИЯ И ЕГО ОСОБЕННОСТИ В АРКТИЧЕСКИХ ОЗЕРАХ КАК СЛЕДСТВИЕ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

© 2024 г. Член-корреспондент РАН Т. И. Моисеенко^{1,*}, М. М. Базова¹

Поступило 13.11.2023 г.

После доработки 14.11.2023 г.

Принято к публикации 14.11.2023 г.

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 и реках. Приведены результаты оригинальных исследований удаленных озер арктической зоны. Выявлена тенденция нарастания содержаний азота и фосфора, а также органического вещества в водах озер даже в случае отсутствия антропогенного воздействия на озеро. 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

DOI: 10.31857/S2686739724030191

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 животноводческими ферм. Общий сток реактивного фосфора в океаны, по оценкам ученых, увеличился в 9–10 раз по сравнению с доиндустриальным периодом [1, 2]. 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 [3, 4].

Эвтрофирование представляет собой угрозу для вод, используемых в качестве питьевого водоснабжения, рыбоводства, рекреации, промышленности, поскольку этот процесс вызывает усиленный рост водных макрофитов

и цианобактерий, выделяющих в воду токсины [1, 5]. В настоящее время не представляется возможным ограничить использование азота и фосфора, как удобрений, поскольку повышение продуктивности полей необходимо для обеспечения продовольствием все возрастающего населения планеты.

В литературе появляется все больше свидетельств, указывающих на влияние сопутствующего потепления климата, которое приводит к изменчивости химического состава вод и эвтрофированию водоемов [6]. Оценивая опасность развития эвтрофирования водоемов, много усилий было приложено к ограничению поступления фосфора и азота в озера и реки с точечными и диффузными источниками. В крупных озерах Америки обозначился процесс олиготрофикации [7], как и в крупных озерах России – Ладоге и Онеге [8].

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.

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской Академии наук, Москва, Россия

*E-mail: moiseenko.ti@gmail.com

Доказанными феноменами влияния потепления климата является повышение содержаний фосфора и азота, которому сопутствует увеличение органического вещества в водах [9, 10]. Многолетние исследования озер Северной Америки показали повышение трофического статуса озер даже в случае отсутствия каких-либо антропогенных источников загрязнения. Сделано заключение об исчезновении олиготрофных озер [11].

В отчетах АМАР [12] 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.

Целью работы было представить: 1) последние данные о нарастающих поступлениях в биосферу азота и фосфора и развитие эвтрофирования водных объектов в Арктическом регионе, 2) доказать влияние потепления климата на эвтрофирование озер Арктического региона, не подверженных прямому воздействию

каких-либо источников загрязнения (на примере Кольского Севера России).

Исходными материалами послужила гидрохимическая база данных по малым озерам Кольского Севера за (1990, 1995, 2000, 2010, 2014 и 2018 гг.). На рис. 1 приведена картосхема региона со схемой точек исследования. Изученные озера расположены в тундровой ($n = 15$), лесотундровой ($n = 21$) и северо-таежной зонах ($n = 32$). Всего было исследовано 68 озер. 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 интеркалибровках. Более подробно методы исследований изложены в работе [13]. Материалы были обобщены по двум периодам: 1990–2000 гг. и 2010–2018 гг. (табл. 1). Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием компьютерной программы “Statistica 10”.

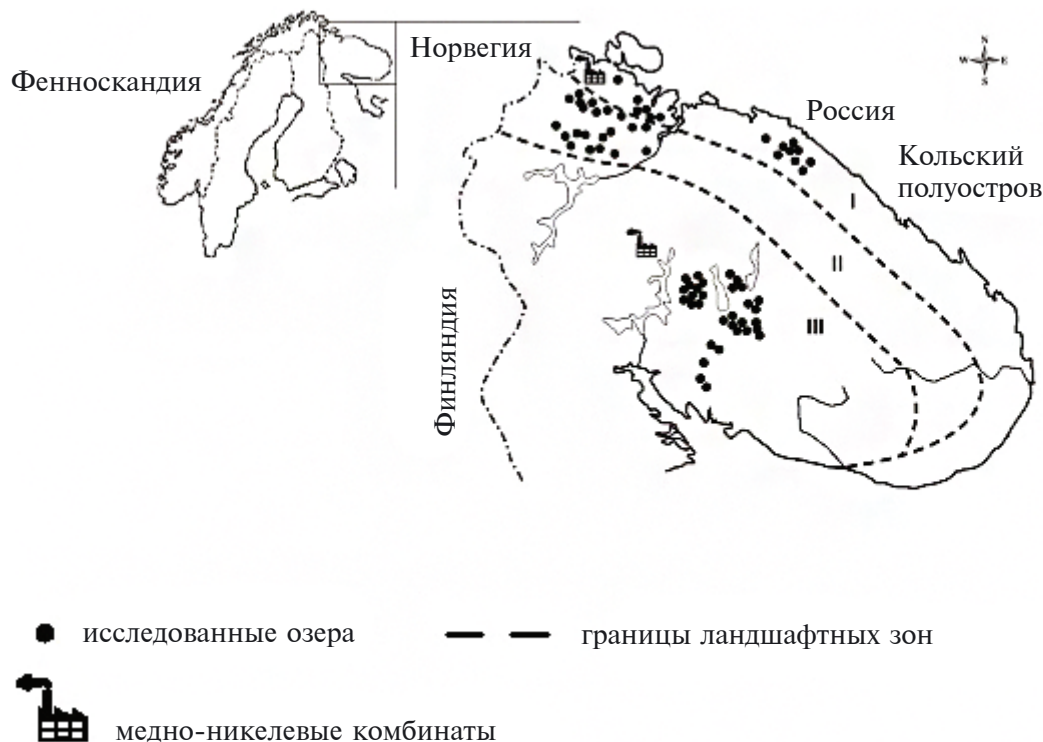


Рис. 1. Карта-схема точек исследованных озер Кольского региона: 1 — тундровая, 2 — лесотундровая, 3 — северо-таежная зоны.

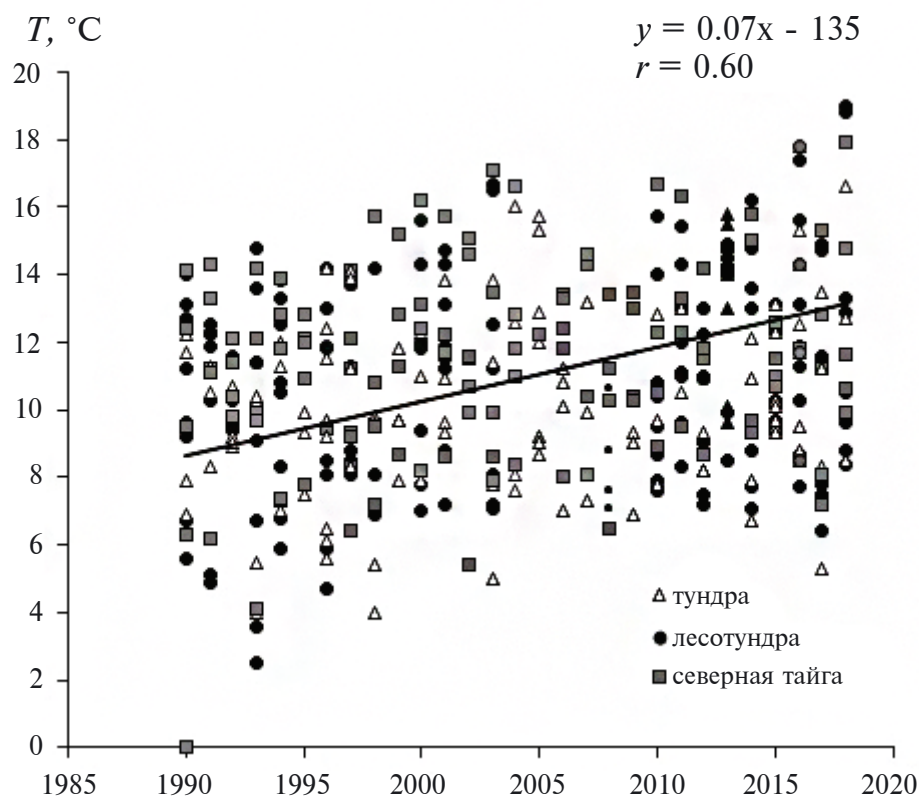


Рис. 2. Среднемесячные температуры приземного слоя воздуха в период открытой воды, T (°C) [14].

Для оценки климатических изменений мы использовали доступные данные по среднемесячной температуре приземного слоя воздуха за 28-летний период наблюдений в период открытой воды (июнь, июль, август и сентябрь) (рис. 2) по трем станциям, расположенным на севере — пос. Териберка (побережье Баренцева моря), в центральной части региона г. Апатиты (водораздел между полуостровом) и на юге Кольского п-ова г. Умба (побережье Белого моря) [14]. Статистически значимый положительный наклон тренда температуры: $r = 0.60$, $p < 0.05$ свидетельствует о потеплении климата в период открытой воды в указанный период при высокой вариабельности, характерной для арктической зоны.

Долговременные тенденции изменения биогенных элементов и органического вещества в условиях потепления климата. В табл. 1 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 и 2010–2018). Динамика

среднегодовой температуры приземного слоя воздуха за 2 периода (1990–2000) и (2010–2018) в разных ландшафтных зонах показала увеличение как по медианным, так и максимальным значениям. 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 воздуха 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. В озерах лесотундровой зоны содержания общего азота (N_{tot}) и общего

Таблица 1. Содержание общего азота (N_{tot}), общего фосфора (P_{tot}), кремния (Si), растворенного органического вещества (DOC), среднемесячная температура приземного слоя воздуха в летне-осенний период (июнь-сентябрь) (T) и среднегодовое количество осадков (P , мм/год) (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 , °C	8.9±1.9 4.0–12.3	10.5±2.1 5.3–16.6	+2.65 <0.05	10.5±2.5 2.5–15.7	11.6±2.6 6.4–18.8	+2.88 <0.01	11.2±2.3 4.1–16.2	12.4±2.5 7.2–17.9	+3.14 <0.01
P , мм/год	468 396–557	436 381–493	– –	337 217–419	593 457–686	+4.56 <0.001	436 381–493	603 504–712	+2.25 <0.05
DOC, мгC/л	5.3±2.3 2.8–10.9	5.8±1.8 2.7–9.9	+2.01 <0.05	6.7±5.7 1.6–16.8	6.8±4.0 3.8–16.5	– –	6.9±2.1 2.1–14.5	7.0±4.1 2.2–17.3	– –
Si, мг/л	1.5±0.9 0.09–3.8	1.3±0.8 0.04–3.5	– –	2.3±1.8 0.03–7.1	1.3±1.7 0.04–8.5	– –	2.0±1.4 0.1–5.2	1.6±1.1 0.04–4.1	-3.74 <0.001
N_{tot} , мкгN/л	186±75 75–470	237±90 70–503	+3.00 <0.01	245±122 57–477	350±163 117–593	+3.22 <0.01	218±63 70–324	238±79 110–381	+2.04 <0.05
P_{tot} , мкгP/л	7±4 2–20	10±9 2–65	+2.26 <0.05	10±11 1–54	20±21 4–93	+2.04 <0.05	8±4 2–20	11±5 3–26	+3.17 <0.01

Примечание: t – критерий Стьюдента, p – уровень значимости: тренд недостоверный.

* 1 – 1990–2000, 2 – 2010–2018.

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, концентрации Si достоверно снизились ($t = -3.74$, $p < 0.001$).

Потоки фосфора и их изменение при потеплении климата. Для расчета потоков фосфора были выбраны 3 модельных озера в различных ландшафтных зонах (тундра, лесотундра и северная тайга). Ниже представлены формулы для расчета по модели В.В. Бульона [15], характеризующие поступление фосфора с водосбора в исследуемые озера:

– $L_a = P \cdot TP_p / 1000$, где L_a – поступление фосфора в озеро с атмосферными осадками, (г/(м²·год)); P – среднегодовое количество осадков, (мм/год); TP_p – содержание фосфора в атмосферных осадках, (мкгP/л) (1);

– $L_d = E \cdot SDA$, где L_d – поступление фосфора в озеро с водосборной площади, (г/(м²·год)), SDA – удельный водосбор (2);

– $E = P_{\text{ter}} \cdot 0.1 \cdot 0.002 \cdot 0.02 \cdot 2 \cdot ((T - 12) / 10) \cdot F_{\text{eu}}$, где E – коэффициент экспорта фосфора с водосборной площади, (г/м² год); (T) – среднемесячная температура приземного слоя воздуха в летне-осенний период (июнь-сентябрь) (табл. 1);

F_{eu} – фактор эвтрофирования озера за счет внешней нагрузки, который для 3 изученных озер равен 1, вследствие отсутствия или минимальной антропогенной нагрузки (3);

– $P_{\text{ter}} = B_{\text{ter}} \cdot V_{\text{ter}} \cdot GS$, где P_{ter} – чистая продукция наземной растительности, (ккал/(м² год)) (4);

– $B_{\text{ter}} = E_{\text{ter}} \cdot GP_{\text{ter}} / (V_{\text{ter}} \cdot GS)$, где B_{ter} – фитомасса на водосборной площади озера, (ккал/м²) (5);

– E_{ter} – эффективность роста, которая для озер северной и северо-западной частей Европейской территории России равна 0.6;

– V_{ter} – скорость оборота биомассы, сут^{–1}, которая для озер северной и северо-западной частей Европейской территории России равна 0.00023;

$GP_{\text{ter}} = (\text{IF } (Eva > P) \text{ THEN } (3000 (1 - \text{EXP}(-0.000664 P))) \text{ ELSE } (3000 / (1 + \text{EXP} (1.315 - 0.119 T)))) / 0.6$, где GP_{ter} – валовая продукция наземной растительности, (ккал/(м²·год)) (6);

$GS = -0.058 \text{ Lat}^2 + 0.549 \text{ Lat} + 36$, где GS – длительность вегетационного сезона, Lat – широта (7);

– $Sed = (L_a + L_d) R$, где Sed – седиментация фосфора в донные отложения, (г/(м²·год)) (8);

– $R = 5 / (5 + G)$, где R – коэффициент седиментации фосфора, G – водная нагрузка

на водоем, (м/год) (отношение средней глубины озера к условному числу лет, необходимому для полного водообмена в озере) (9);

– $TP_{int} = (L_a + L_d) (1 - R) T_w$, где TP_{int} – фосфорная нагрузка, (г/(м²·год)) (10);

– $Out = TP_{int} / T_w$, где Out – потеря фосфора со стоком воды, (г/(м²·год)) (11);

– $T_w = D_{mean} / (0.0315 Mo SDA)$, где T_w – время пребывания воды в озере, (год); D_{mean} – средняя глубина, (м); Mo – модуль стока (12).

Расчеты, выполненные по модели, показывают комплексную реакцию системы “водосбор – водоем” на повышение температурных условий. Согласно нашим расчетам, повышение среднегодовой температуры приземного слоя воздуха на 1.1°C (табл. 1) по сравнению с периодом 1990–2000 гг. стало причиной увеличения поступления фосфора с водосборной площади (L_d) в озеро. Наряду с увеличением количества атмосферных осадков и поступления в озеро фосфора в их составе это привело к росту фосфорной нагрузки на водоемы в 2–3.5 раза (табл. 2).

Для озера, расположенного в тундровой зоне (1), к 2010–2018 гг. отмечено увеличение фосфорной нагрузки (TP_{int}) на 0.14 г/м² × год за счет поступления фосфора с водосборной площади (L_d), которое, в свою очередь, увеличилось к 2010–2018 году по сравнению с периодом 1990–2000 в 2 раза (от 0.24 до 0.52 г/м² × год). Несмотря на отсутствие прямого антропогенного загрязнения, а именно выноса с сельскохозяйственных и урбанизированных территорий, отмечен рост коэффициента экспорта фосфора с водосборной площади (E) (с 0.009 до 0.019 г/м² × год

соответственно) за счет повышения среднегодовой температуры приземного слоя воздуха на 1.1°C (табл. 1), в то же время седиментация фосфора в донные отложения увеличилась в 2 раза (Sed).

Для озера, расположенного в лесотундровой зоне (2), к 2010–2018 гг. фосфорная нагрузка (TP_{int}) увеличилась в 3 раза (с 0.16 до 0.56 г/м² × год), за счет увеличения среднегодовой суммы осадков с 337 до 593 мм (табл. 1) и, соответственно, поступления фосфора в озеро с атмосферными осадками (L_a), а также поступления фосфора с водосборной территории. Поступление фосфора с водосборной площади (L_d) увеличилось в 4 раза к 2010–2018 гг. по отношению к 1990–2000, вследствие увеличения среднегодовой температуры приземного слоя воздуха на 1.1°C (табл. 1), потеря фосфора со стоком воды (Out) увеличилась к 2010–2018 году почти в 3.5 раза. Коэффициент экспорта фосфора с водосборной площади (E) увеличился в 3 раза (с 0.003 до 0.010 г/м² × год соответственно) вследствие повышения среднегодовой температуры приземного слоя воздуха на 1.1°C (табл. 1).

Увеличение фосфорной нагрузки с 0.25 до 0.86 г/м² × год на озеро северо-таежной зоны (3) связано с повышением среднегодовой температуры воздуха на 1.1°C, так и с увеличением среднегодовой суммы осадков к 2010–2018 гг. по отношению к 1990–2000 на 167 мм (табл. 1). Для данного озера характерны самые высокие значения коэффициента экспорта фосфора с водосборной площади (E) (табл. 2).

К 2010–2018 гг. по сравнению с периодом 1990–2000 гг. произошло снижение количества

Таблица 2. Потоки фосфора в озерах по В.В. Бульону [15] (1 – озеро в тундровой зоне, 2 – озеро в лесотундровой зоне, 3 – озеро в северо-таежной зоне)

Параметры год	Потоки фосфора, г/м ² ·год	1		2		3	
		1*	2*	1	2	1	2
TP_{int}	содержание фосфора под единицей площади акватории озера	0.12	0.26	0.16	0.56	0.25	0.86
L_d	поступление фосфора в озеро с водосборной площади	0.24	0.52	0.03	0.12	0.09	0.32
E	коэффициент экспорта фосфора с водосборной площади	0.009	0.019	0.003	0.010	0.010	0.035
Sed	седиментация фосфора в донные отложения	0.07	0.14	0.07	0.02	0.05	0.18
L_a	поступление фосфора в озеро с атмосферными осадками	0.007	0.008	0.003	0.006	0.006	0.008
Out	потеря фосфора со стоком воды	0.34	0.73	0.08	0.27	0.21	0.71

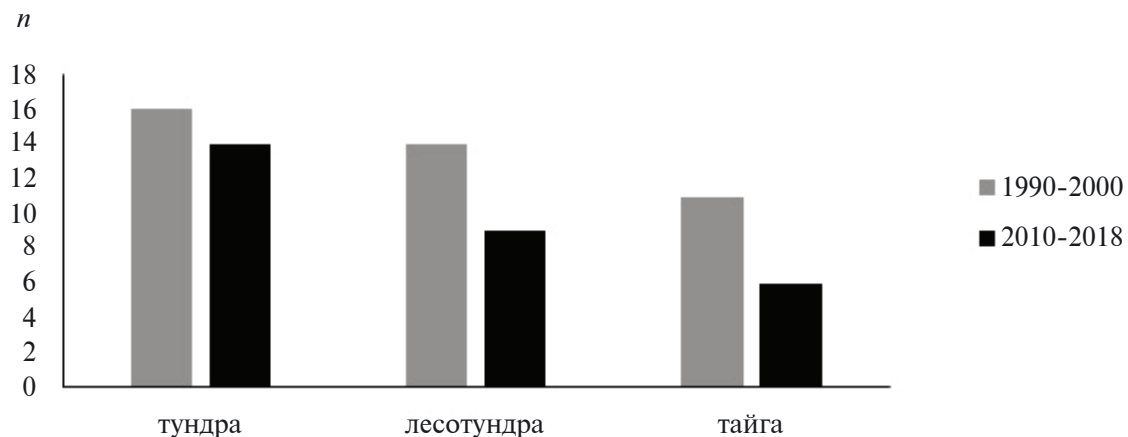


Рис. 3. Количество озер (n) с концентрацией $P_{\text{tot}} < 10$ мкгР/л в тундре, лесотундре и тайге в различные периоды: 1990–2000 и 2010–2018.

озер с концентрацией фосфора < 10 мкгР/л (рис. 3), 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 (табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее столетие остро обозначилась проблема эвтрофирования водоемов вследствие неконтролируемого поступления огромного количества биогенных элементов и органических веществ в биотический круговорот. Арктические регионы располагают огромным фондом малых олиготрофных озер, не затронутых прямым влиянием человеческой деятельности. Влияние потепления климата на фоне глобального рассеивания фосфора может 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. Наши расчеты показали, что к периоду 2010–2018 гг. по сравнению с периодом 1990–2000 гг. произошло увеличение потоков фосфора с водосборной площади в исследованные озера с разной интенсивностью: в озеро тундровой зоны — в 2 раза, лесотундровой — в 4 раза, северо-таежной — в 3.5 раза. Таким образом, доказано, что потепление климата оказывает влияние на повышение трофического статуса арктических удаленных озер.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abid A.A., Gill S.S.* Eutrophication: Causes, Consequences and Control. Volume 2. Springer Dordrecht Heidelberg London New York. 2014. 262 pp.
2. *Zhang X., Davidson E.A., Zou T., Lassaletta L., Quan Z., Li T., Zhang W.* Quantifying nutrient budgets for sustainable nutrient management // *Global Biogeochemical Cycles*. 2020. 34. e2018GB006060.
3. *Henderson-Sellers B., Markland H.R.* Decaying Lakes. The Origin and Control of Cultural Eutrophication. 1990. L.: Gidrometeoizdat. 280 p.
4. *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. P. 255–264.
5. *Deng J., Qin B., Sarvala J., Salmaso N., Zhu G., Ventelä A.M., Zhang Y., Gao G., Nurminen L., Kirkkala T., Tarvainen M., Vuorio K.* Phytoplankton assemblages respond differently to climate warming and eutrophication: A case study from Pyhäjärvi and Taihu. // *J. of Great Lakes Research*. 2016. V. 42 № 2. P. 386–396.
6. *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

- выпадения кислот: восстановление или эволюция озер? // Геохимия. 2022. Т. 67. № 2. С. 668–685.
7. Great Lake Ecosystem Report. 2007. Available online: <http://www.epa.gov/glnpo/rptcong>. (accessed on 9 March 2006).
 8. 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.
 9. De Wit H.A., Stoddard J.L., Monteith D.T., James E.S., Austnes K., Couture S., Fölster J., Higgins S.N., Houle D., Hruška J., Krám P., Kopeček J., Paterson A.M., Herman S.V., Vuorenmaa V.D., Evans C.D. Cleaner air reveals growing influence of climate on dissolved organic carbon trends in northern headwaters // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16. P. 104009.
 10. 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.
 11. Stoddard J.L., Van Sickle J., Herlihy A.T., Brahmey J., Paulsen S., Peck D.V., Mitchell R., Pollard A.I. Continental-scale increase in lake and stream phosphorus: Are oligotrophic systems disappearing in the United States? // Environ. Sci. Technol. 2016. V. 50. P. 3409–3415.
 12. 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).
 13. 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.
 14. Архив погоды: Мурманская область. 2019. Справочно-информационный портал “Погода и климат” (<http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php?id=ru®ion=51>).
 15. Бульон В.В. Биотический поток вещества и энергии в системе “озеро и его водосбор” // Успехи современной биологии. 2018. Т. 138. № 5. С. 503–515.

THE GLOBAL PROCESS OF EUTROPHICATION AND ITS FEATURES IN ARCTIC LAKES AS A CONSEQUENCE OF CLIMATE WARMING

Corresponding Member of the RAS T. I. Moiseenko^{a, #}, M. M. Bazova^a

^aVernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#]E-mail: moiseenko.ti@gmail.com

An analysis of the problem of water bodies eutrophication as a global process is presented. The volumes increasing use of nitrogen and phosphorus on a planetary scale are shown, the dispersion of which leads to an increase in the content of nutrients in lakes and rivers. The results of original studies of remote lakes in the Arctic zone are presented, which showed an increase in the concentrations of nutrients in lakes in recent decades. 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 influence. It has been established that an increase in temperature and climate warming in the Arctic regions exert the main influence on the increase in the content of nutrients and the trophic status of lakes.

Keywords: eutrophication, nutrients, phosphorus fluxes, dissolved organic matter, trophic status