

ПОТОКИ ФОСФОРА В МАЛЫХ ОЗЕРАХ РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН

© 2022 г. М. М. Базова*

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

**e-mail: mm.bazova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 31.01.2021 г.

После доработки 10.06.2021 г.

Принята к публикации 15.06.2021 г.

Рассмотрены факторы формирования фосфорной нагрузки на озера различных ландшафтов (от тундровой до степной зоны). Расчеты балансовой модели показали, что фосфорная нагрузка преимущественно определяется условным водообменом, площадью удельного водосбора и модулем водного стока. Статистический анализ отразил совокупное влияние ландшафтных (заболоченность, залесенность) и климатических особенностей (годовая сумма осадков, сумма активных температур, длительность вегетационного сезона), определяющих потоки фосфора в озерах. Озера от тундровой до лесостепных зон характеризуются невысоким уровнем трофии (мезотрофные), озеро степной зоны – высоким (эвтрофное). Рассчитаны и проанализированы фактические фосфорные нагрузки в озерах в период осенней гомотермии относительно критических нагрузок в период весеннего перемешивания.

Ключевые слова: малые озера, фосфорные нагрузки, внешние факторы среды, водосборный бассейн

DOI: 10.31857/S0016752522020029

ВВЕДЕНИЕ

В начале XX века быстрый рост населения и антропогенная деятельность привели к заметным изменениям глобального цикла потоков химических элементов. В своих исследованиях В.И. Вернадский писал, что увеличение подвижности атомов вследствие антропогенной деятельности является естественным закономерным процессом, который не противоречит двум биогеохимическим принципам: 1) “биогенная миграция атомов химических элементов в биосфере всегда стремится к максимальному проявлению” и 2) “эволюция видов в ходе геологического времени, приводящая к созданию форм жизни, устойчивых в биосфере, идет в направлении, увеличивающем биогенную миграцию атомов биосферы” (Вернадский В.И., 2001). Ко второй половине XX в. увеличение численности и условий жизни населения, и соответственно влияние на природные процессы привело к глобальным экологическим проблемам в общем и, в частности, к антропогенным трансформациям биогеохимических циклов азота и фосфора. С точки зрения геохимии, наибольшие изменения миграционных потоков происходят для фосфора – одного из главных элементов, контролирующих продуктивность водных экосистем (Коплан-Дикс, Алексеев, 1985; Bilgrami et al., 1993; Thorsten, 1994). Фосфор

участвует как в природных геохимических и биохимических процессах, так и в процессах техногенеза. Природное поступление фосфора в водные системы зависит от продукции наземной растительности и определяется внешними факторами среды – количеством осадков, испарением и температурой (Mackenzie et al., 1998; Smil, 2000; Bennett et al., 2001; Seitzinger et al., 2005). Среди антропогенных факторов выделяют точечные (коммунально-бытовые стоки) (Turner et al., 2003; Harrison et al., 2005; Liu et al., 2008; Bouwman et al., 2009; Mayorga et al., 2010; Kroeze et al., 2012; Penuelas et al., 2013; Mekonnen, Hoekstra, 2017) и диффузные источники загрязнения (смыв с сельскохозяйственных угодий минеральных и органических удобрений) (Simard et al., 1995; Van Dreht et al., 2009; Mor et al., 2013). Основной вклад в усиление антропогенной миграции фосфора вносит производство и применение фосфорных удобрений (Tilman, 1999; Tilman et al., 2001; Vitousek et al., 2009). Изучение геохимии фосфора в системах, подверженных техногенному влиянию, в последние десятилетия связано в основном с процессами антропогенного эвтрофирования природных вод, которая является актуальной проблемой для многих регионов, имеющих высокую плотность населения, промышленность и интенсивно развивающееся сельское хозяйство.

В условно-фоновых водных объектах (не подверженных каким-либо прямым источникам загрязнения) эвтрофирование связано с накоплением в водной толще соединений фосфора и азота. Вопрос природного эвтрофирования остается дискуссионным по сегодняшний день. Даденко Ю.С. (2007) в своей работе отмечает, что озера в системе ландшафтов на протяжении длительного периода накапливают минеральные и органические вещества, вследствие чего при продолжительной эволюции в озере происходят изменения могут происходить изменения гидрологического и термического режимов, которые являются абиотическими факторами развития фитопланктона в водоемах. Другими словами, процесс эвтрофирования в условиях отсутствия антропогенного воздействия не прекращается. Существует иная точка зрения: В.В. Бульон (1998) и D.C. Harper (1992) утверждают, что эвтрофирование — это антропогенный процесс, связанный с нерациональным природопользованием. Они считают, что многолетние изменения продуктивности водоемов связаны с региональными и глобальными изменениями климата. В 1982 г. активно велись исследования на пресных озерах Европы и Северной Америки по программе OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), на основании проведенных исследований был сделан вывод о том, что в большинстве озер общий фосфор является первичным фактором, лимитирующим первичную продукцию (OECD, 1982).

В.В. Бульон (2005, 2017) в своих работах провел исследования, направленные на поиск взаимосвязей между процессами, происходящими в водной и наземной экосистемах и характеристиками, обусловленными влиянием зональных факторов). Результатом этих исследований послужила балансовая модель, которая характеризует отклик экосистемы озера на изменение внешних условий, имеющих природный и антропогенный характер (Бульон, 2018).

Целью статьи являлось выявление сходств и различий в формировании фосфорной нагрузки исследованных малых озер; нахождение факторов, характеризующих сходства между процессами, протекающими в водоемах и на водосборе, и параметрами среды, обусловленными влиянием зональности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Характеристика объектов исследования

В статье исследованы 6 озер, расположенные на территории Европейской территории России (ЕТР), охватывающей тундровую и таежную зоны, смешанные леса, лесостепную и степную зоны. Исследованные озера существенно различаются по ряду морфометрических параметров,

средняя глубина варьирует от 1.5 до 16 м, площадь удельного водосбора — от 7.5 до 200, модуль стока — от 2 до 13 л/с м², коэффициент условного водообмена — от 0.25 до 5.04. Ландшафтные показатели также различаются: заболоченность водосборов озер варьирует от 0 до 88%, залесенность — от 7 до 79%, заозеренность — от 0.5 до 12.5%. По климатическим параметрам: среднегодовая температура воздуха — от -0.9 до 9.8°C, сумма активных температур — от 400 до 2500, годовая сумма осадков — от 264 до 771 мм, испарение с водной поверхности — от 273 до 598 мм/год (табл. 2). Для оценки ландшафтных параметров была использована структурно-генетическая классификация ландшафтов В.А. Николаева (2000) (табл. 1). На рисунке 1 представлена карта-схема исследованных озер.

Оз. *Кийяр* расположено на северо-востоке Мурманской области (рис. 1). Водосбор площади по типу почв и растительности относится к морской арктической тундровой зоне, покрытый кустарниками и березовым редколесьем. Генетический тип ландшафта представлен ледниковыми отложениями, почвы преимущественно тундровые (табл. 1). *Топозеро* находится в среднетаежной зоне Республики Карелия. Из-за изрезанности береговой линии образовано много заливов, острова сосредоточены преимущественно у западного и южного берегов (Озера Карелии, 2013). Генетический тип ландшафта представлен водно-ледниковыми отложениями. На водосборе преобладают 2 типа почв — подзолистые торфяно-глеевые и иллювиально-гумусовые, растительность представлена елово-сосновыми лишайниковыми лесами (табл. 1). *Пяжозеро* расположено на юге таежной зоны Вологодской области. Ландшафтная структура представлена моренными суглинистыми и глинистыми отложениями, почвы преимущественно 2 типов болотно-подзолистые и дерново-подзолистые (табл. 1). Для ландшафта характерен замедленный поверхностный сток, наибольшую площадь занимают еловые березовые, хвойные и болотные леса, 1/10 территории занимают переходные и низинные болота (Воробьев, 2007). Оз. *Глубокое* расположено в зоне смешанных лесов, почвы преимущественно дерново-подзолистые, наибольшую площадь занимают темнохвойные и сосновые леса. Ландшафтная структура представлена моренными супесчаными отложениями (табл. 1). Антропогенную нагрузку в оз. Глубокое, расположенном на территории Тверской области, создают сельскохозяйственные угодья и база отдыха (Мидоренко, Краснов, 2009). *Пляжное озеро* расположено в лесостепной зоне Самарской области. Ландшафтная структура представлена аллювиально-озерными песчаными отложениями (Горелик и др., 1996). Почвенная структура представлена типичными выщелоченными черноземами (табл. 1). Для озера характерна незна-

Таблица 1. Структурно-генетическая классификация ландшафтов по В.А. Николаеву (2000)

Таксон	Деление	Название озера					
		оз. Кийвр	оз. Топозеро	оз. Пяозеро	оз. Глубокое	оз. Плязное	оз. Кравцово
Отдел	Тип контакта и взаимодействия геосфер	Наземные и водные	Наземные и водные	Наземные и водные	Наземные и водные	Наземные и водные	Наземные и водные
Разряд	Термические параметры климатических поясов	Субарктические	Умеренные	Умеренные	Умеренные	Умеренные	Умеренные
Подразряд	Континентальность, сезонные климатические различия	Морская тундра	Переходный от морского к континентальному	Переходный от морского к континентальному	Умеренно-континентальные	Умеренно-континентальные	Умеренно-континентальные
Семейство	Региональная локализация на уровне физико-географических стран	Морская арктическая зона	Атлантико-арктическая зона	Атлантико-континентальная зона	Атлантико-континентальная зона	Атлантико-континентальная зона	Морская зона
Тип	Типы почв и классы растительных формаций	Тундровые, кустарник и березовое редколесье	Среднетаежная, подзолы торфянисто-глеевые, иллювиально-гумусовые песчаные и супесчаные	Южнотаежные, болотно-подзолы и дерново-подзолистые, еловые березовые, сосновые леса	Смешанные леса, дерново-подзолистые, темно-хвойные и сосновые леса	Лесостепная, типичные выщелоченные черные земли	Степи полновыщелочные-типичные, черные обыкновенные, остаточные-солонцеватые
Род	Морфология и генезис рельефа (генетический тип ландшафта)	Ледниковый	Водно-ледниковый	Моренный	Моренный	Аллювиально-озерный	Элювиально-делювиальный
Подрод	Литология поверхностных отложений	Валунные	Песчано-гравийные	Сулинистые и глинистые	Супесчаные	Песчаные	Суглинки, Щебень

Таблица 2. Морфометрические, ландшафтные, климатические, абиотические и гидрохимические показатели исследованных озер

Параметр	Обозначение	Кийявр	Топозеро	Пяжозеро	Глубокое	Пляжное	Кравцово
Морфометрические							
Средняя глубина, м	Dmean	8.5	16	1.5	4.8	3.0	2.5
Прозрачность воды, м	Sec	2.04	2.14	2.19	1.72	3.64	2.01
Время пребывания воды в озере, год	Tw	2.73	5.43	0.63	3.27	4.7	0.2
Гидравлическая нагрузка, м/год	G	3.11	2.95	2.36	1.47	0.64	12.6
Удельный водосбор	SDA	9.4	7.2	7.9	4.9	7.5	200
Модуль стока, л/(с км ²)	Mo	10.5	13	9.5	9.5	2.7	2
Высота над уровнем моря, м	Alt	165	149	223	224	55	492
Ландшафтные							
Заозеренность, %	fоз	9	9	13	0.5	0	0
Заболоченность, %	fБ	6.7	16	45	17	0	88
Залесенность, %	fл	7.9	79	22	70	30	7
Абиотические							
Географическая широта, ° с.ш.	Lat	68.02	61.33	60.17	57.06	53.3	45.01
Долгота, ° в.д.	Lon	35.07	33.13	35.37	32.5	49.32	41.5
Климатические							
Длительность вегетационного сезона, дни	GS	127	179	187	207	228	272
Сумма активных температур	$\sum T > 10^{\circ}\text{C}$	400	1300	1300	1500	1750	2500
Испарение с водной поверхности, мм/год	И	250	450	500	550	680	875
Годовая сумма осадков, мм/год	O	300	525	575	600	450	600
Гидрохимические							
pH	pH	6.23	5.72	5	7.41	8.19	8.66
Электропроводность при 20°C, мкСм/см	χ	31	16	25	105	358	586
Цветность воды, ° Pt-Co	Цв.	13	51	43	59	10	21
Содержание общего органического углерода, мгС/л	ТОС	5.2	8.8	7.4	10.8	4.6	8.8
Содержание общего фосфора в воде, мкгР/л	TP	11	13	14	21	12	33
Содержание общего фосфора в атмосферных осадках, мкгР/л	TP _{pre}	30	30	30	30	30	30
Степень зарастания озера макрофитами, %	Мcov	5.66	5.93	6.09	4.77	10.12	5.58

чительная антропогенная нагрузка, которая выражается загрязнением нитратным и аммонийным азотом, нефтепродуктами, поступающими со сточными водами сельскохозяйственных угодий (Доклад..., 2019). *Кравцово озеро* расположено в богаторазнотравной-ковыльно-типчаковой степи в Ставропольском крае. Тип ландшафта представлен аллювиально-делювиальными отложениями с прослоями суглинков и щебня, тип почв — полынно-ковыльно-типчаковые и черноземы обыкновенные остаточного-солонцеватые (табл. 1). Особенностью Кравцова озера является то, что в засушливые годы оно мелеет и превращается в

болото, меняется растительность, а в дождливые — озеро восстанавливается (Куксова и др., 2016).

БАЗА ДАННЫХ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Отбор проб проводился в 2005 г. в осенний период, характеризующийся затуханием вегетационных процессов, гомотермией и отсутствием стратификации: тундрово-таежная зона (оз. Кийявр, Топозеро, Пяжозеро) — конец августа-конец сентября, смешанные леса (оз. Глубокое) — конец сентября, лесостепная и степная зоны (оз. Пляжное и Кравцово) — конец октября. В исследова-



Рис. 1. Карта-схема расположения исследованных озер.

ния включались озера, не подверженные прямым источникам загрязнения (уже в начале сказано), площадь водного зеркала которых варьировала от 0.04 до 11.2 км². Пробы были отфильтрованы в по-

левых условиях с помощью установки "Milipore", далее фильтрованные и нефильтрованные подкисляли азотной кислотой и отправляли в лаборатории для дальнейших анализов. Результаты

измерений были получены методом ICP-MS на масс-спектрофотометре Plasma Quad-3 фирмы Fisons Instruments Elemental Analysis (Великобритания). Материалы, которые предоставлены для анализа и обобщения, выполнены по единым методикам в соответствии с соблюдением методов и рекомендаций ICP – Water программы (Standart Methods, 1992; Mosello et al., 1996) в лабораториях Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (ИППЭС КНЦ РАН) и Института водных проблем РАН. Аналитическая программа работ включала в себя определение pH – потенциометрическим методом; электропроводности при 20° (χ) – кондуктометрическое определение; цветности (Цв) – фотометрическое определение; содержания общего органического углерода (ТОС) по перманганатной окисляемости по формуле:

$$\text{ТОС} = 0.764 \text{ ХПК}_{\text{Mn}} + 1.55 \quad (1)$$

общий фосфор (TP) – разложение персульфатом калия в кислой среде, спектрофотометрическое определение голубого фосфорно-молибденового комплекса; содержания фосфатов (PO_4^{3-}) – спектрофотометрическое определение фосфорно-молибденового комплекса; общий азот (TN) – окисление персульфатом калия в щелочной среде до нитратов, восстановление нитратов в нитриты кадмием, спектрофотометрическое определение азотсоединения; нитратов (NO_3^-) – восстановление нитратов до нитритов пропусканием через колонку с омедненным кадмием и спектрофотометрическое определение азотсоединения.

Методы исследований

За основу упрощенной модели была взята прогностическая модель биотического потока фосфора и энергии в наземных и озерных экосистемах, представленная в работе Бульона В.В. (2018). Модель рассчитана с помощью системы “Stella”, которая формирует результаты в автоматическом режиме. Вследствие того, что она недоступна для широкого круга пользователей, она была преобразована в формат Excel с сохранением балансового принципа. Для достижения целей работы, данная модель, отражающая совокупное влияние абиотических факторов и морфометрических характеристик водоема на величину фосфорной нагрузки, автором статьи представлена в упрощенном виде (рис. 2).

В упрощенной модели в качестве входных параметров использованы параметры, полученные в полевых исследованиях: 1. абиотические: Lat – географическая широта, ° с.ш; Lon – долгота, ° в.д;

2. морфометрические и ландшафтные характеристики: F_o – площадь водной поверхности озера,

км², Alt – высота над уровнем моря, м абс., F_b – площадь водосбора озера, км², f_o – заозеренность водосборной территории, %, fl – залесенность, %, fb – заболоченность, %, были определены по топографическим картам масштаба 1 : 200000 региональных атласов исследованных регионов (Мурманская область, Республика Карелия, Вологодская область, Тверская область, Самарская область, Ставропольский край). M_o – модуль стока, л/(с км²), D_{mean} – средняя глубина, м.

3. климатические параметры, такие как O – среднегодовое количество осадков, мм/год, И – среднегодовая испаряемость, мм/год, сумма температур воздуха за период со средней суточной температурой выше 10°C ($\Sigma T > 10^\circ\text{C}$) использовались в качестве главных показателей зональности.

Далее приведены уравнения, заимствованные из работы Бульона В.В. (2018), которые используются для расчета параметров модели:

F_{eu} – фактор эвтрофирования озера, который для 6 изученных равен 1, вследствие отсутствия или минимальной антропогенной нагрузки.

$$R = 5/(5 + G) \text{ – коэффициент седиментации фосфора,} \quad (2)$$

$$T_w = D_{\text{mean}}/(0.0315 M_o SDA) \text{ – время пребывания воды в озере, год, где } D_{\text{mean}} \text{ – средняя глубина,} \quad (3)$$

SDA – удельный водосбор,

M_o – модуль стока (Китаев, 2007),

$$K_b = 1/T_w, \text{ – коэффициент условного водообмена, год}^{-1} \text{ (Сорокин, 1988).} \quad (4)$$

Фосфорная нагрузка и еще составляющие были рассчитаны по следующим формулам (Бульон, 2018):

$$\text{TP}_{\text{int}} = (L_a + L_d)(1 - R) T_w \text{ – содержание фосфора под единицей площади акватории озера, г/м}^2 \text{ год),} \quad (5)$$

TP_{pre} – содержание фосфора в атмосферных осадках, мкгP/л;

$$L_a = \text{Pre TP}_{\text{pre}}/1000 \text{ – поступление фосфора в озеро с атмосферными осадками, г/(м}^2 \text{ год),} \quad (6)$$

$$L_d = E SDA \text{ – поступление фосфора в озеро с водосборной площади, г/(м}^2 \text{ год),} \quad (7)$$

$$\text{Sed} = (L_a + L_d) R \text{ – седиментация фосфора в донные отложения, г/(м}^2 \text{ год),} \quad (8)$$

$$\text{Out} = \text{TP}_{\text{int}}/T_w \text{ – потеря фосфора со стоком воды, г/(м}^2 \text{ год),} \quad (9)$$

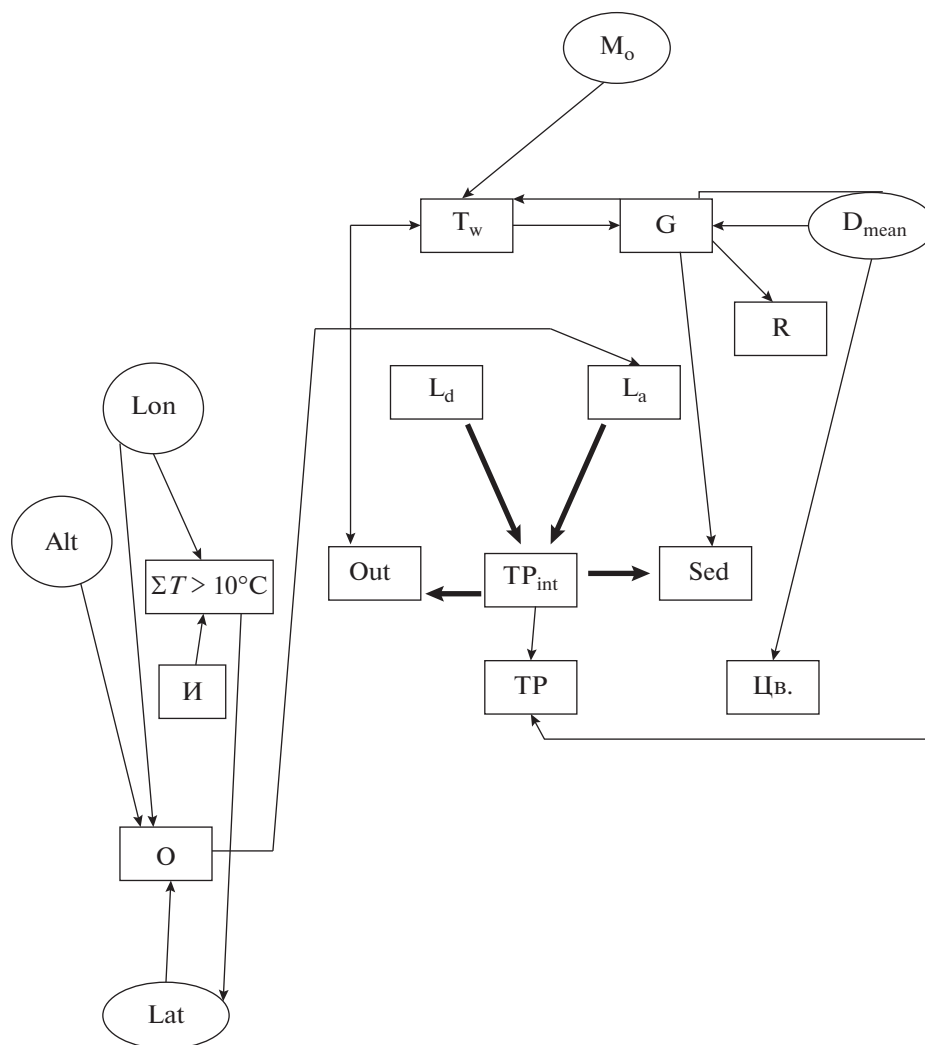


Рис. 2. Схема упрощенной балансовой модели, описывающая поступление фосфора с водосбора в воды озер. За основу взята балансовая модель, представленная в работе Бульона В.В. (2018).

$$E = P_{\text{тер}} \times 0.1 \times 0.002 \times 0.02 \times 2^{(T_{\text{ем}} - 12/10)} \times F_{\text{eu}} -$$

коэффициент экспорта фосфора (10)

с водосборной площади, г/м² год.

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием компьютерной.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрохимическая характеристика исследованных озер

Вода в озере *Кийявр* является слабокислой (рН 6.23). Концентрация ТР в озере в период исследования составила 11 мкгР/л, ТН – 246 мкгN/л, ТОС и цветность также низкие (13° Рт-Со и 5.2 мгС/л).

Вода в *Топозере* слегка закисленная (рН 5.72). Содержание ТР на момент исследования составило

13 мкг/л. Высокие значения цветности (51° Рт-Со) обусловлены высоким содержанием ТОС (8.8 мгС/л), что подтверждается уравнением регрессии: $\text{ТОС} = 0.09 \times \text{Цв.} + 4.5$ ($r = 0.84$, $n = 6$, $p = 0.04$).

Пяжозеро вследствие того, что находится среди болот (фБ – 45%) в ландшафтах волнистых моренных равнин, имеет кислую среду (рН = 5.0), повышенные содержания ТОС (7.4 мгС/л). Высокие содержания ТР (14 мкгР/л) высокой заболоченностью, что подтверждается статистически значимой связью: $\text{фБ} = 3.3 \times \text{ТР} - 28$ ($r = 0.85$, $n = 6$, $p = 0.03$).

Воды в озере *Глубокое* нейтральные (рН 7.41), повышенное содержание ТОС в воде (10.8 мгС/л) и цветность (59° Рт-Со) связаны с высокой степенью заболоченности (17%) и залесенности водосбора (70%). Высокие значения цветности статисти-

Таблица 3. Результаты расчетов по балансовой модели В.В. Бульона (2018)

Параметры	Кийявр	Топозеро	Пяжозеро	Глубокое	Пляжное	Кравцово
потоки фосфора, г/м ² год						
Tr _{int}	0.04	0.13	0.02	0.05	0.06	0.55
La	0.009	0.016	0.014	0.018	0.014	0.018
Ld	0.03	0.05	0.06	0.05	0.09	3.89
Sed	0.026	0.041	0.047	0.050	0.094	1.109
Out	0.016	0.024	0.022	0.015	0.012	2.794
R	0.62	0.63	0.68	0.77	0.89	0.28
E	0.0032	0.0069	0.0052	0.0067	0.0123	0.0194

стически значимо связаны с высокой залесенностью: $C_b = 1.2 \times f_L - 2.8$ ($r = 0.79$, $n = 6$, $p = 0.05$).

Озеро *Пляжное* слабощелочное (pH 8.19), характеризуется низкими значениями цветности (10° Pt-Co) и содержания растворенного ТОС (4.6 мгС/л), которые обусловлены высокой электропроводностью.

Озеро *Кравцово* щелочное (pH 8.66), характеризуется низкими значениями цветности (21° Pt-Co), слегка закисленное (pH 5.72). Повышенные содержания ТОС (8.8 мгС/л) и ТР (33 мкгР/л) обусловлены высокой заболоченностью водосбора (88%). Это подтверждается статистически значимой связью ТОС с ТР: $f_b = 3.3 \times ТР - 28$ ($r = 0.85$, $n = 6$, $p = 0.03$).

ОЦЕНКА ФОСФОРНОЙ НАГРУЗКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОСБОРА И КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Согласно схеме балансовой модели, представленной на рис. 2, фосфорная нагрузка на озеро складывается из суммарного поступления биогенных веществ с водосборной площади (L_d) и с атмосферными осадками (L_a). Формулы, которыми были рассчитаны показатели фосфорной нагрузки представлены в разделе “методы исследований”. Учитывая, что сведений о содержании фосфора в атмосферных осадках (TR_{pre}) мало, в модель заложено медианное значение, равное 30 мкгР/л, полученное в работе Савенко (1996). Повышенное содержание биогенных веществ, поступающих с водосбора и вклад атмосферных осадков в фосфорную нагрузку, отмечен в озере Кравцово, за счет очень большого удельного водосбора (табл. 2), минимальное в Пяжозере, соответственно, максимальная фосфорная нагрузка получена на озеро Кравцово (0.55 г/м² год), минимальная – на Пяжозеро (0.02 г/м² год) (табл. 3).

Минимальная потеря фосфора со стоком (Out) отмечена для озера Пляжное (0.012 г/м² год),

вследствие низкого значения Мо и Кв, соответственно самое высокое значение коэффициента седиментации фосфора (R) отмечено в озере Пляжное (0.89 г/м² год) вследствие низкого значения гидравлической нагрузки (G) (табл. 2). Коэффициент экспорта фосфора с водосборной площади (E) имеет природную и антропогенную составляющие (табл. 3). Расчеты показали, что вклад антропогенной составляющей имеет место в озерах Пляжное (0.0123 г/м² год) и Кравцово (0.0194 г/м² год). Природная составляющая экспорта фосфора увеличивается в направлении от северных широт к южным от 0.0032 до 0.012 г/м² год, что согласуется с данными, приведенными в работах (OECD, 1976; Коплан-Дикс и др., 1985; Одум, 1986). Вследствие этого можно полагать, что на территориях, где расположены озера Кийявр, Топозеро, Пяжозеро и Глубокое антропогенная нагрузка минимальна или практически отсутствует.

РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАСТЕРНОГО И МНОГОМЕРНОГО ФАКТОРНОГО АНАЛИЗОВ

Для выявления сходств и различий исследованных озер был проведен кластерный анализ. По результатам кластерного анализа было выделено 3 группы озер (рис. 3). В первый кластер с минимальной дистанцией входят озера Кийявр, Топозеро и Пяжозеро, которые схожи такими показателями, как Мо, SDA, Sec, foz, ТР, χ , R, Mcov (табл. 2).

Ко второму кластеру относятся озеро Кравцово и Пляжное, которые отличаются от других изученных водоемов Dmean, Мо, минимальной fL, pH, цветностью, GS, E (табл. 2).

Отдельную группу представляет озеро Глубокое, за счет отличий от других озер минимальным SDA, высокой fL, pH, χ , высокой цветностью и ТОС (табл. 2).

Был проведен многомерный факторный анализ (RDA), основанный на представлении дан-

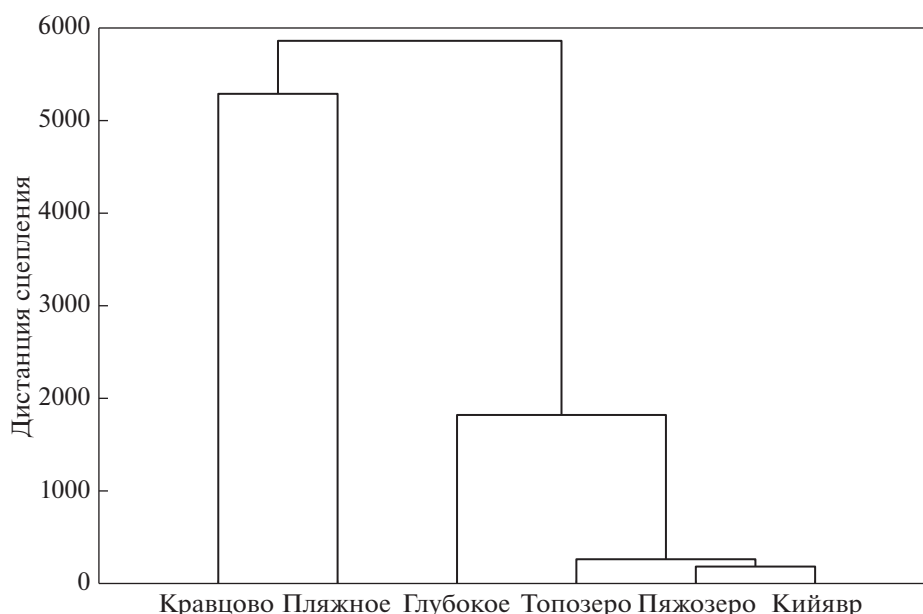


Рис. 3. Дендрограмма классификации изученных озер методом одиночного сцепления.

ных в векторной шкале независимых параметров (осей) и точек как зависимых от состояния компонентов (рис. 4). Результаты анализа (RDA) для всех озер указывают на тесную взаимосвязь между заболоченностью (fБ) и модулем стока (Мо). Также в качестве независимых параметров были выбраны сумма активных температур ($\sum T > 10^\circ\text{C}$) и осадки (О). Согласно полученным статистическим результатам, основными показателями, определяющими фосфорную нагрузку на озера, являются морфометрические показатели (Мо) и ландшафтные (fБ). Сумма активных температур (климатический фактор) оказывает влияние на интенсивность выноса фосфора с водосборной площади (Е). Количество атмосферных осадков, выпавших на водную поверхность (О) является составляющей внешнего водообмена и соответственно влияет на время полного водообмена (Tw).

ХАРАКТЕРИСТИКА ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ОЗЕР

Для оценки трофического статуса водоемов используют разные интегральные индексы. Наибольшую популярность приобрел предложенный Р. Карлсоном индекс TSI (1977). В его основу положены регрессионные уравнения, связывающие такие показатели трофности, как прозрачность, концентрация хлорофилла “а” и содержание общего фосфора. Система уравнений для расчета TSI имеет вид:

$$TSI_{SD} = 60 - 14.41 \ln SD, \quad (11)$$

$$TSI_{Chl} = 9.81 \ln ChI + 30.6. \quad (12)$$

Вследствие того, что данные по содержанию хлорофилла “а” отсутствуют, для расчета индекса Карлсона были использованы уравнения, в которых задействованы прозрачность и содержание общего фосфора. В табл. 4 приведены значения индекса Карлсона для различных типов трофности (Carlson, 1977). В табл. 5 представлены трофические статусы исследованных озер.

Согласно расчетам, приведенным в таблице 5, озера — Кийявр, Топозеро, Пяозеро, Глубокое, Пляжное относятся к продуктивным (мезотрофному типу). Топозеро и Пяозеро обладают схожими чертами: расположены на заболоченных территориях, с кислой реакцией среды. Озера Кийявр и Пляжное вследствие низкой степени заболоченности характеризуются низкими показателями цветности, схожими значениями ТР и ТОС. Озеро Глубокое вследствие высокой степени залесенности и заболоченности отличается от вышерассмотренных озер высокими показателями цветности и ТОС. В тоже время, повышенное по сравнению с другими озерами содержание ТР свидетельствует об усилении процесса эвтрофирования в сторону эвтрофного трофического ста-

Таблица 4. Градации индекса Карлсона для различных типов трофности водоемов

Тип водоема	TSI
Олиготрофный	0–30
Мезотрофный	30–50
Эвтрофный	50–70
Гипертрофный	70–100

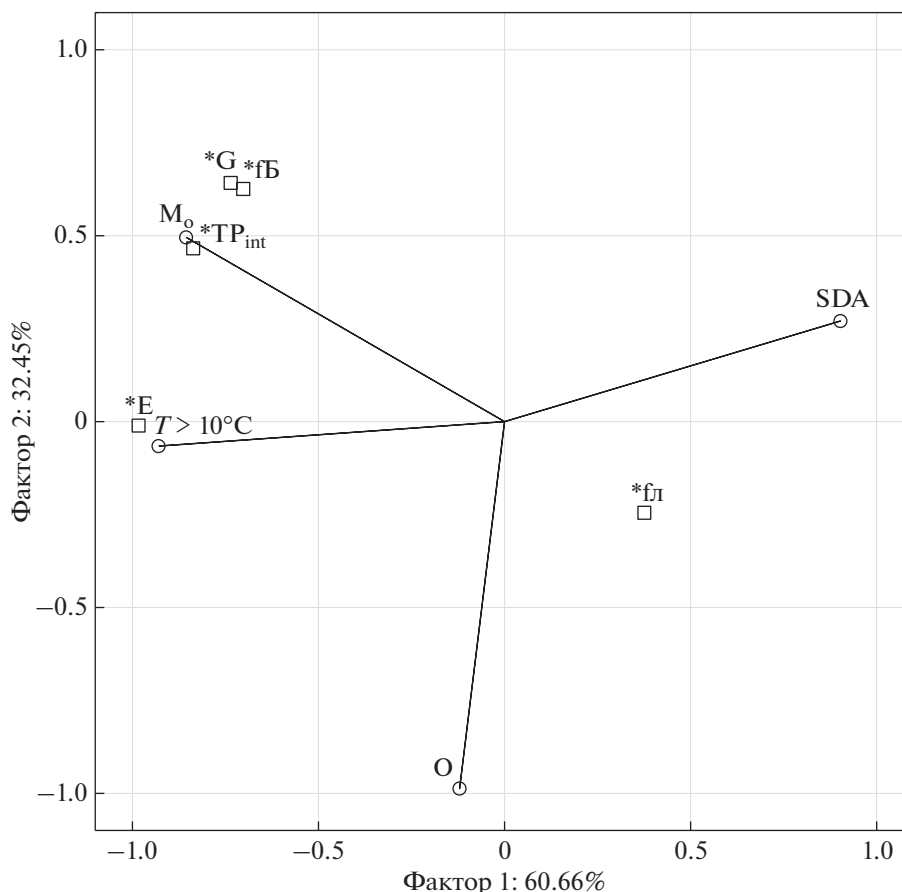


Рис. 4. Осеваая диаграмма RDA распределения независимых и зависимых переменных. Оси — независимые параметры: сумма активных температур ($T > 10^{\circ}\text{C}$), модуль стока (M_o), годовая сумма осадков (O), заболоченность ($fБ$); точки — зависимые параметры.

туса. Самым продуктивным озером является Кравцово (эвтрофное). Оно отличается от других озер высокой степенью заболоченности (88%), содержаниями общего фосфора, длительностью вегетационного сезона, источником питания являются атмосферные осадки и грунтовые воды. Такие отличия связаны с особенностями флоры: в водной среде преобладают гидрофильные растения, а водоохранная зона характеризуется преобладанием лугово-степной растительности. Они обусловлены зональными и аazonальными факторами, микро- и мезорельефом озера и характеризуют растительность в условиях континентальности климата (Белоус, Волкова, 2016).

СРАВНЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ И КРИТИЧЕСКИХ ФОСФОРНЫХ НАГРУЗОК В ИССЛЕДУЕМЫХ ОЗЕРАХ

Для оценки влияния фосфора, поступающего в водоем с водосборной площади на переход экосистемы с одного уровня трофии на другой Р. А. (1976) предложил уравнение для расчета критической фосфорной нагрузки:

$$L_{кр} = 25L_w (1 + T_w^{0.5}), \quad (13)$$

где 25 — критическая концентрация фосфора в озере в период весеннего перемешивания, мкг/л; T_w — время полного водообмена озера, год; L_w —

Таблица 5. Значения индекса Карлсона и трофический статус озер

Показатель	Кийявр	Топозеро	Пяозеро	Глубокое	Пляжное	Кравцово
TSIsd	50	49	49	52	41	50
TSITP	39	41	42	48	40	55
TSIсреднее	45	45	45	45	41	53
Трофический статус	Мезотрофный	Мезотрофный	Мезотрофный	Мезотрофный	Мезотрофный	Эвтрофный

Таблица 6. Фактические и критические фосфорные нагрузки озер, имеющих различные морфометрические показатели

Озеро	Морфометрические показатели			Фосфорная нагрузка			
	средняя глубина, м	время полного водообмена, лет	водная нагрузка на водоем, м/год	критическая		фактическая	
				тонн	г/(м ² год)	тонн	г/(м ² год)
Кийявр	8.5	2.73	3.11	17.4	0.21	3.7	0.04
Топозеро	16	5.43	2.95	9.0	0.25	4.8	0.13
Пяжозеро	2.5	1.06	2.36	10.5	0.12	2.1	0.02
Глубокое	4.8	3.27	1.47	4.1	0.10	1.9	0.05
Пляжное	3.0	4.70	0.64	0.06	0.05	0.07	0.06
Кравцово	2.5	0.20	12.60	3.6	0.46	4.4	0.55

водная нагрузка на водоем, м/год (отношение средней глубины озера к условному числу лет, необходимому для полного водообмена в озере). Из табл. 6 видно, что в озерах Кийявр, Топозеро, Пяжозеро и Пляжное не выявлено превышения фосфорной нагрузки в период осенней гомотермии, по сравнению с периодом весеннего перемешивания. В озере Пляжное значения как в осенний, так и весенний период были практически одинаковыми. В озере Кравцово получено превышение критической нагрузки, которое зависит от климатических особенностей конкретного года, то есть в засушливые годы оно мелеет и превращается в болото, меняется растительность, а в дождливые — озеро восстанавливается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях зональности от тундровой до степной зоны рассмотрены особенности формирования потоков фосфора и биопродуктивности озер. В условиях отсутствия или минимальной антропогенной нагрузки поступление фосфора и биопродуктивность определяются совокупностью факторов: климатические, ландшафтные, морфометрические и гидрохимические. Анализ фосфорной нагрузки в озерах разных ландшафтных зон позволил выявить морфометрические показатели, определяющие потоки и вынос фосфора со стоком: в озере среднетаежной зоны высокое содержание фосфора связано с периодом водообмена, в озере степной зоны максимальное содержание фосфора определяется большой величиной удельного водосбора. Минимальный вынос фосфора со стоком был отмечен в озере лесостепной зоны вследствие низкого значения модуля стока и коэффициента условного водообмена.

Кластерный анализ позволил выделить три группы озер, сходных по морфометрическим и гидрохимическим показателям в озерах различных ландшафтных зон. Озера тундровой, среднетаежной и южнотаежной зон схожи модулями

стока и показателями удельных водосборов, а также значениями электропроводности, содержания общего фосфора. Озера лесостепной и степной зон отличаются средней глубиной, модулем стока, а также рН и цветностью. Озеро, расположенное в зоне смешанных лесов, отличается от изученных озер показателем удельного водосбора, рН, минерализацией, повышенными значениями цветности и растворенного органического углерода.

Многомерный факторный анализ отразил совокупное влияние климатических (сумма активных температур, годовое количество осадков), ландшафтных (заболоченность) и морфометрических (модуль стока) показателей на формирование потоков фосфора в озерах.

Были рассчитаны индексы трофности, которые показали, что озера тундровой, средне- и южнотаежной, смешанных лесов и лесостепной зон являются продуктивными (мезотрофными). Озеро, расположенное в степной зоне относится к эвтрофному типу, то есть более продуктивное.

Расчеты критических фосфорных нагрузок показали, что в озерах Кийявр, Топозеро, Пяжозеро и Глубокое значения фактических фосфорных нагрузок не превышены. В озере Кравцово, расположенное в южных широтах, превышение критической фосфорной нагрузки определяется климатическими особенностями года. Таким образом, климатические факторы и связанные с ним характеристики определяют потоки фосфора и степень трофического статуса озер.

Работа выполнена в рамках Госзадания ГЕОХИ РАН № 0137-2019-0008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Мурманской области (Карты) Ред. коллегия: гл. ред. канд. геогр. наук А.Г. Дуров и др. Москва, 1971. 1 атл. (33 с.)
- Белоус В.Н., Волкова В.В. (2016) К вопросу фиторазнообразия водно-болотного комплекса Ставрополь-

- ской возвышенности (на примере озера-болота Кравцово) *Актуальные проблемы химии, биологии и биотехнологии материалы X Всероссийской научной конференции*, 19–22.
- Бульон В.В. (1998) Имеет ли место естественное эвтрофирование озер. *Водные ресурсы*. **25**(6), 759–764.
- Бульон В.В. (2005) Моделирование потоков энергии в озерных экосистемах как инструмент гидробиологических исследований. *Водные ресурсы*. **32**(3), 361–370.
- Бульон В.В. (2017) Влияние географических факторов на биологическую продуктивность озерных экосистем: моделирование и прогноз. *Сибирский экологический журнал*. **2**, 127–135.
- Бульон В.В. (2018) Биотический поток вещества и энергии в системе “озеро и его водосбор”. *Успехи современной биологии*. **138**(5), 503–515.
- Вернадский В.И. *Химическое строение биосферы Земли и ее окружения* (2001) М.: Наука, 376 с.
- Воробьев Г.А. (2007) Природа Вологодской области. Вологда: “Издательский Дом Вологжанин”, 440 с.
- Горелик Д.О., Ишанин Г.Г., Конопелько Л.А., Хворов Г.В., Розенберг Г.С. и др. (1996) Экологический атлас г. Тольятти. СПб.: НПО “Мониторинг”.
- Даценко Ю.С. (2007) Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты, 252 с.
- Доклад об экологической ситуации в Самарской области за 2019 г. (2020) Выпуск 30. Самара, 174 с.
- Китаев С.П. (2007) Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КНЦ РАН, 395 с.
- Коплан-Дикс И.С., Алексеев В.Л. (1985) Изменение роли природных и антропогенных процессов в развитии эвтрофирования континентальных вод. *Экология*. **5**, 20–23.
- Куксова М.А., Арустамова С.Н., Олимова Л.С. (2016) Оценка экологической обстановки Кравцова озера. Актуальные проблемы обеспечения безопасности в техносфере и защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 15-летию основания кафедры “Защита в чрезвычайных ситуациях”. Ставрополь: Изд. Дом “Тэсра” 154–156.
- Мидоренко Д.А., Краснов В.С. (2009) Мониторинг водных ресурсов. Учеб. пособие. Тверь: Твер. гос. ун-т, 77 с.
- Николаев В.А. (2000) *Ландшафтоведение. Семинарские и практические занятия*. М.: МГУ, 93 с.
- Одум Ю. (1986) *Экология*. Т. 2. М.: Мир, 376 с.
- Озера Карелии. (2013) Справочник (Под ред. Н.Н. Филатова, В.И. Кухарева) Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 464 с. + вкл.: ил., табл. Библиогр. 302 назв.
- Сорокин И.Н. (1988) Внешний водообмен озер СССР (Отв. ред. Г.В. Назаров) АН СССР, Ин-т озероведения. Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, 144 с.
- Bennett E.M., Carpenter S.R., Caraco N.F. (2001) Human impact on erodable phosphorus and eutrophication: A global perspective *BioScience*. **51**(3), 227–234.
- Bilgrami K.S., Kumar Sheo, Sahay S.S. (1993) Use of quantitative and qualitative indices for evaluation of water quality of the Ganga. *Proc. Indian Nat. Sci. Acad. B*. **59**(1), 59–65.
- Bouwman A.F., Beusen A.H.W., Billen, G. (2009) Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970–2050. *Global Biogeochem. Cycles*. **23**, GB0A04.
- Carlson R.E. (1977) A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*. **22**(2), 361–369.
- Van Drecht G., Bouwman A.F., Harrison J., Knoop J.M. (2009) Global nitrogen and phosphate in urban wastewater for the period 1970 to 2050 *Global Biogeochem. Cycles*. **23**, GB0A03.
- Harper D. (1992) *What is eutrophication? Eutrophication of Freshwaters*. Springer, Dordrecht, 1–28.
- Harrison J.A., Seitzinger S.P., Bouwman A.F., Caraco N.F., Beusen A.H.W., Vorosmarty C.J. (2005) Dissolved inorganic phosphorus export to the coastal zone: Results from a spatially explicit, global model. *Global Biogeochem. Cycles*. **19**, GB4S03.
- Kroeze C., Bouwman L., Seitzinger S. (2012) Modeling global nutrient export from watersheds. *Curr. Opin. Environ. Sust.* **2**, 195–202.
- Liu Y., Villalba G., Ayres R.U., Schroder H. (2008) Global phosphorus flows and environmental impacts from a consumption perspective. *J. Ind. Ecology*. **12**(2), 229–247.
- Mackenzie F.T., Ver L.M., Lerman A. (1998) Coupled biogeochemical cycles of carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur in the land ocean atmosphere system. In J. N. Gallo-way and J. M. Melillo (Eds.), *Asian change in the context of global climate change* (pp. 42–100). N.Y.: Cambridge University Press.
- Mayorga E., Seitzinger S.P., Harrison J.A., Dumont E., Beusen A.H.W., Bouwman A.F., Fekete B.M., Kroeze C., Van Drecht G. (2010) Global Nutrient Export from Watersheds 2 (NEWS 2): Model development and implementation. *Environ. Model. Soft.* **25**(7), 837–853.
- Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y. (2017) Global anthropogenic phosphorus loads to freshwater and associated grey water footprints and water pollution levels: A high-resolution global study. *Water Resour. Res.* **53**, 1–14.
- Mosello R., Bianchi M. (1994–1997) Geiss HAQUACON-MedBas “Acid rain analysis”, 1996. Ispra.
- Mor ee A.L., Beusen A.H.W., Bouwman A.F., Willems W.J. (2013) Exploring global nitrogen and phosphorus flows in urban wastes during the twentieth century *Global Biogeochem. Cycles*. **27**, 836–846.
- OECD (1982) Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control: P.OECD, 154.
- Penuelas J., Poulter B., Sardans J., Ciais P., van der Velde M., Bopp L., Goddérís Y., Hinsinger P., Llusà J., Nardin E., Vicca S., Obersteiner M., Janssens I. (2013) Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe *Nat. Commun.* **4**, 2934.
- Seitzinger S.P., Harrison J.A., Dumont E., Beusen A.H.W., Bouwman A.F. (2005) Sources and delivery of carbon, nitrogen, and phosphorus to the coastal zone: An overview of Global Nutrient Export from Watersheds (NEWS) models

- and their application. *Global Biogeochem. Cycles*. **19**, GB4S01.
- Simard R.R., Cluis D., Gargbazo G., Beauchemin S. (1995) Phosphorus status of forest and agricultural soils from a watershed of high animal density. *J. Environ. Qual.* **24**(5), 1010-1017
- Smil V. (2000) Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences. *Annual Review of Energy and the Environment*. **25**(1), 53-88.
- Standard methods for the examination of water and wastewater. (1992) Wash. (D.C.): Amer. Publ. Health Assoc.
- Thorsten (1994) Regression statistics as a tool to evaluate excess (anthropogenic) phosphorus, nitrogen, and organic matter in classification of Swedish fresh water quality. *Water Air Soil Pollut.* **74**(1-2), 169-187.
- Tilman D. (1999) Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*. **96**(11), 5995-6000.
- Tilman D., Fargione J., Wolff B., D'antonio C., Dobson A., Howarth R., Schindler D., Schlesinger W., Simberloff D., Swackhamer D. (2001) Forecasting agriculturally driven global environmental change *Science*. **292**(5515), 281-284.
- Turner R.E., Rabalais N.N., Justic D., Dortch Q. (2003) Global patterns of dissolved N, P and Si in large rivers. *Biogeochemistry*. **64**(3), 297-317.
- Vitousek P.M., Naylor R., Crews T., David M.B., Drinkwater L.E., Holland E., Johnes P., Katzenberger J., Martinelli L., Matson P., Nziguheba G., Ojima D., Palm C., Robertson G.P., Sánchez P., Townsend A., Zhang F.S. (2009) Nutrient imbalances in agricultural development *Science*. **324**(5934), 1519-1520.
- Vollenweider R.A. (1975) Input – output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweiz. Z. Hydrol.* **37**, 53-84.