

ВНЕШНЯЯ И ВНУТРЕННЯЯ ФОСФОРНАЯ НАГРУЗКА НА ДУДЕРГОФСКИЕ ОЗЕРА

*А.В. Терехов¹, Н.С. Обломкова², М.В. Шмакова¹,
Н.В. Игнатьева¹, А.Ю. Брюханов², С.А. Кондратьев¹*

¹ Институт озераведения РАН, antonvterekhov@gmail.com

² Институт инженерных и агроэкологических проблем сельскохозяйственного производства

Представлены результаты расчетов современного уровня внешней и внутренней фосфорной нагрузки на систему Дудергофских озер, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Оценка внешней нагрузки выполнена с использованием модели ILLM в сочетании с данными спутниковой съемки водосбора, оценка внутренней нагрузки — на основе данных натурных наблюдений. Установлено, что в условиях средней водности на поверхность водосбора поступает 2,621 т P/год, водосбором и его гидрографической сетью удерживается 1,627 т P/год, нагрузка на акваторию озер с водосбора составляет 0,994 т P/год. При этом внешняя нагрузка на озера системы пропорциональна их водосборным площадям. Внутренняя нагрузка оценивается в 0,168 т P/год. Суммарная фосфорная нагрузка на единицу площади самого крупного Дудергофского озера, характеризующегося наихудшими показателями качества воды, в 4,2 раза превышает нагрузку на два других озера водной системы.

Ключевые слова: биогенная нагрузка, фосфор, математическое моделирование, сельское хозяйство, Дудергофские озера, модель ILLM.

EXTERNAL AND INTERNAL PHOSPHORUS LOAD ON DUDERHOF LAKES

*A.V. Terekhov¹, N.S. Oblomkova², M.V. Shmakova¹,
N.V. Ignatyeva¹, A.Yu. Bryukhanov², S.A. Kondratyev¹*

¹ Institute of Limnology Russian Academy of Sciences

² Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production

The results of calculations of the current level of external and internal phosphorus load on the system of Duderhof lakes located on the territory of St. Petersburg are presented. The external load was estimated using the ILLM model in combination with the satellite data of the catchment area and the internal load — on the basis of the data of field research. It was found that in medium runoff conditions on the catchment surface receives 2.621 t P/year, catchment area and its hydrographic network retains 1.627 t P/year, the load on the aquatic area of the lakes from the catchment area is 0.994 t P/year, with the external load on the lakes is proportional to their catchment areas. The internal load is estimated at 0.168 t P/year. The total phosphorus load per unit area of the largest Duderhof lake, characterized by the worst water quality, is 4.2 times higher than the load on the other two lakes of the aquatic system.

Key words: nutrient load, phosphorus, mathematical modeling, agriculture, Duderhof lakes, ILLM model.

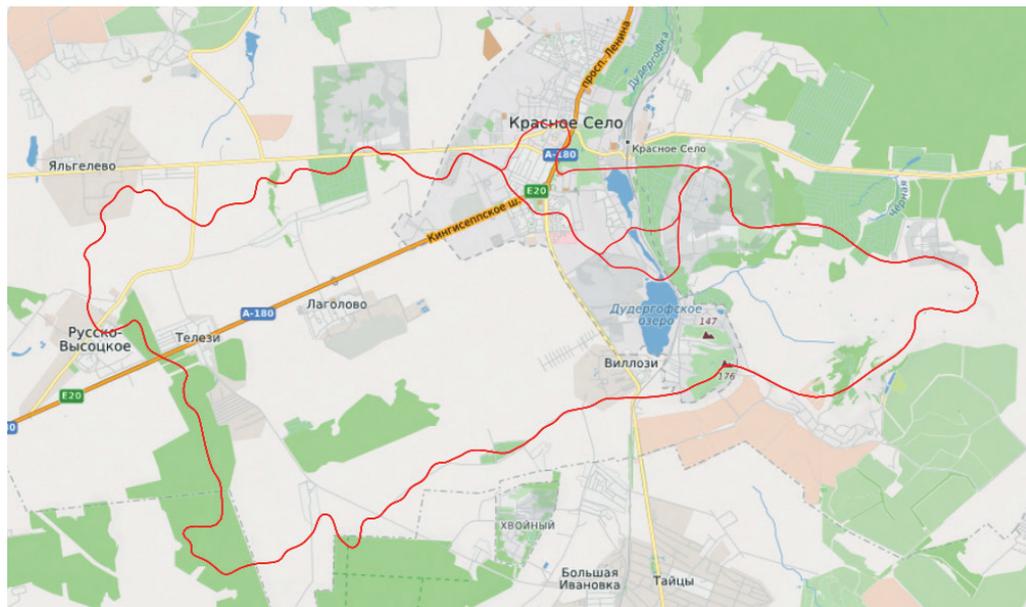


Рис. 1. Схема водосбора Дудергофских озер.

Введение

Дудергофские озера, расположенные в Красносельском районе Санкт-Петербурга, являются частью водной системы, которая берет свое начало на Дудергофской возвышенности, принадлежащей Ижорскому плато. Возвышенность прорезана двумя каньонообразными долинами, образованными приледниковыми потоками, в одной из которых расположена система озер — верхнее Дудергофское (площадь зеркала 0,69 км², средняя глубина 1,5 м), среднее Долгое (площадь зеркала 0,09 км², средняя глубина 1,2 м) и нижнее Безымянное (площадь зеркала 0,19 км², средняя глубина 3,0 м). Озера разделены плотинами, поэтому их гидрологический режим схож с режимом водохранилищ. Рассчитанная с использованием геоинформационных технологий общая водосборная территория Дудергофских озер (створ — исток реки Дудергофки) составляет 55,65 км² (рис. 1), причем большая часть площади (93 %) приходится на водосбор озера Дудергофского, остальные 7 % — на водосборы озер Долгого и Безымянного.

Основная часть водосбора озер расположена на территории Ломоносовского и Гатчинского районов Ленинградской области, относящихся к наиболее развитым территориям области в сфере сельскохозяйственного производства. Кроме того, источниками загрязнения озер являются сток с территории малоэтажной застройки поселков Виллози и Дудергоф, сброс коммунально-бытовых сточных вод, автомобильные и железная дороги, интенсивное рекреационное использование.

Повышенная природная минерализация вод системы, обусловленная ландшафтными особенностями Ижорского плато, сложенного карбонатными породами, создает повышенную буферную емкость, что обеспечивает относительную устойчивость системы по отношению к внешним негативным воздействиям. Тем не менее комплексное антропогенное воздействие приводит к ухудшению экологического состояния озер, вызванного, прежде всего, развитием эвтрофирования. В настоящее время трофический статус озер по фосфору оценивается как мезоэвтрофный [10, 23].

Фосфорная нагрузка на водоем представляет собой сумму двух слагаемых — внешней нагрузки, формирующейся на водосборе, и внутренней нагрузки, формирующейся в самом водоеме.

При изложении материалов, связанных с формированием выноса фосфора с водосбора и внешней фосфорной нагрузки на Дудергофские озера, в настоящей работе использована терминология, основанная на классификации ХЕЛКОМ PLC-Water [24], согласно которой по отношению к источникам формирования внешняя нагрузка на водный объект разделяется на точечную и неточечную (рассредоточенную).

Точечная нагрузка формируется за счет сбросов в первичную гидрографическую сеть водосбора или непосредственно в водоем-водоприемник очищенных и неочищенных сточных вод промышленных, муниципальных и сельскохозяйственных предприятий, локализованных в одном или нескольких местах. Рассредоточенная нагрузка формируется за счет выноса веществ со всей площади водосбора в основном за счет эмиссии химических веществ из почв в стекающие дождевые и талые воды и смыва взвешенных и растворенных примесей с поверхности водосбора [11].

В зависимости от происхождения источника рассредоточенная нагрузка может классифицироваться как природная (фоновая, естественная) или диффузная (антропогенная). Природная составляющая нагрузки формируется за счет выноса химических веществ с естественных ландшафтов (лесов, болот, лугов естественного происхождения и др.) и части выноса с обрабатываемых земель, который происходит независимо от хозяйственной деятельности.

Диффузная составляющая нагрузки представляет собой рассредоточенный вынос с водосборных территорий растворенных и взвешенных примесей антропогенного происхождения. К числу диффузных источников относятся сельскохозяйственные угодья, пашни, пастбища, удобряемые и заброшенные площади, свалки, селитебные площади, стоки с которых не попадают на очистные сооружения. В рекомендациях ХЕЛКОМ [24] определены шесть основных путей диффузного поступления биогенных веществ в водные объекты — это поверхностный сток, эрозия, подземные воды, дренажные воды, атмосферные воды и сток с городских территорий.

Внутренняя нагрузка представляет собой поток вещества из донных отложений в водную массу водоема. В отличие от внешней нагрузки внутренняя нагрузка является вторичной, поскольку формируется за счет веществ, однажды уже

поступивших в водоем извне. Осевший на дно взвешенный фосфорсодержащий материал подвергается на его поверхности и далее в толще донных отложений диагенетическим преобразованиям, в результате которых часть фосфора вновь поступает в водную массу, пополняя фосфорный запас, а оставшийся фосфор безвозвратно захоранивается в осадке.

В результате в пограничной зоне осадок — вода непрерывно осуществляется вертикальный транспорт вещества в противоположных направлениях, где основными потоками фосфора являются потоки седиментации на поверхность дна (*S*), захоронения в толще осадка (*B*) и поступления из донных отложений в водную массу (*J*). По мере эвтрофирования водоема возрастают абсолютные значения потоков и изменяется их соотношение: меньшая доля фосфора аккумулируется в донных отложениях, тогда как вторичное его поступление в водную массу существенно возрастает, что приводит к так называемому вторичному эвтрофированию, усиливающему развитие этого негативного процесса. Таким образом, при эвтрофировании водоема роль донных отложений в качестве дополнительного, внутреннего источника фосфора существенно возрастает [9, 13, 17].

Основными транспортными механизмами поступления фосфора из донных отложений в водную массу являются диффузия и конвективный перенос. В свою очередь, суммарная диффузия включает в себя диффузию непосредственно с поверхности осадка и диффузию из толщи отложений. Механизмы конвективного переноса более разнообразны: они включают ветровое и антропогенное взмучивание осадка, биотурбацию, газоотделение со дна, деятельность бентических рыб, прикрепленных макрофитов и ряд других, менее значимых процессов [15, 16]. Кроме того, в период осеннего охлаждения на мелководье действует конвективно-диффузионный механизм переноса [7]. Внутренняя фосфорная нагрузка на водоем формируется в результате суммарного действия всех вышеперечисленных механизмов.

Целью настоящего исследования является количественная оценка современного уровня фосфорной нагрузки на систему Дудергофских озер, так как именно поступление фосфора определяет скорость эвтрофирования изучаемых водоемов и ухудшение их экологического состояния.

Внешняя фосфорная нагрузка

Для количественной оценки биогенной нагрузки на Дудергофские озера со стороны водосборного бассейна в настоящей работе использованы методы математического моделирования. Расчеты выполнялись по модели *ILLM* — *Institute of Limnology Load Model* (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612519 от 27.02.2014), разработанной в Институте озераведения РАН на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования выноса биогенных веществ с водосборных территорий [11, 12, 14, 18, 21, 22], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [25]. Модель ориентирована на существующие ограниченные возможности

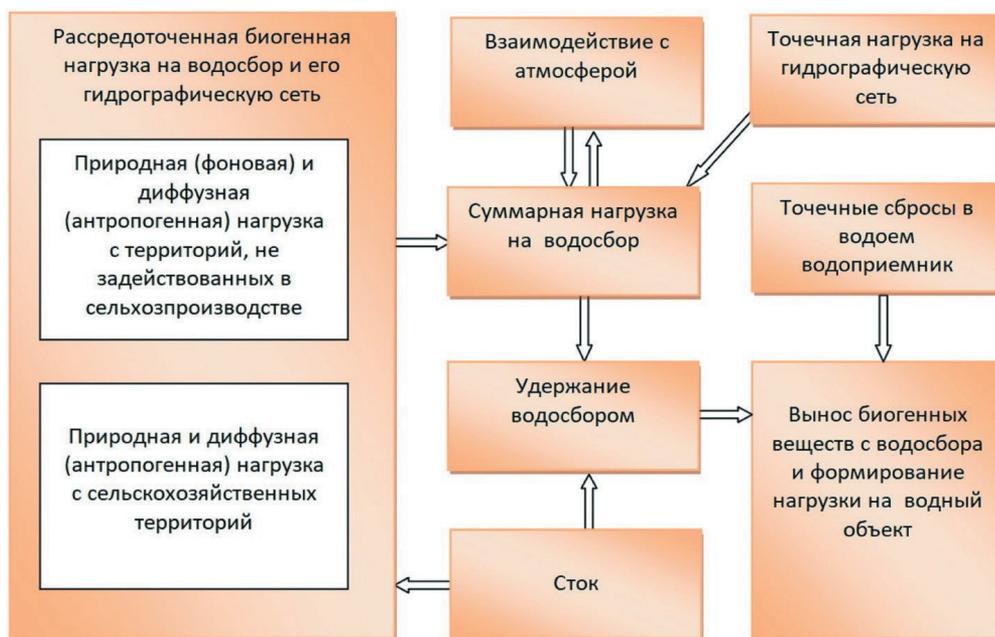


Рис. 2. Схема модели, описывающей вынос биогенных веществ с водосбора и формирование внешней биогенной нагрузки на водоемы.

информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов Росгидромета, а также структур государственной статистической отчетности о сбросах сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах РФ.

На рис. 2 приведена общая структура математической модели выноса общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водоем. Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование биогенной нагрузки на водосбор, позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбора с учетом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью. Конечным итогом моделирования является количественная оценка биогенной нагрузки на водоем со стороны водосбора и отдельных ее составляющих. Достаточно подробное описание модели приведено в работах [11, 12, 14].

Как правило, существенные проблемы при моделировании выноса биогенных веществ с крупных водосборов возникают в связи с необходимостью достоверного определения современных значений площади различных типов подстилающей поверхности. Для идентификации типов подстилающей поверхности на водосборе Дудергофских озер были использованы мультиспектральные космические снимки со спутника Landsat-8. Были выбраны безоблачные разносезонные

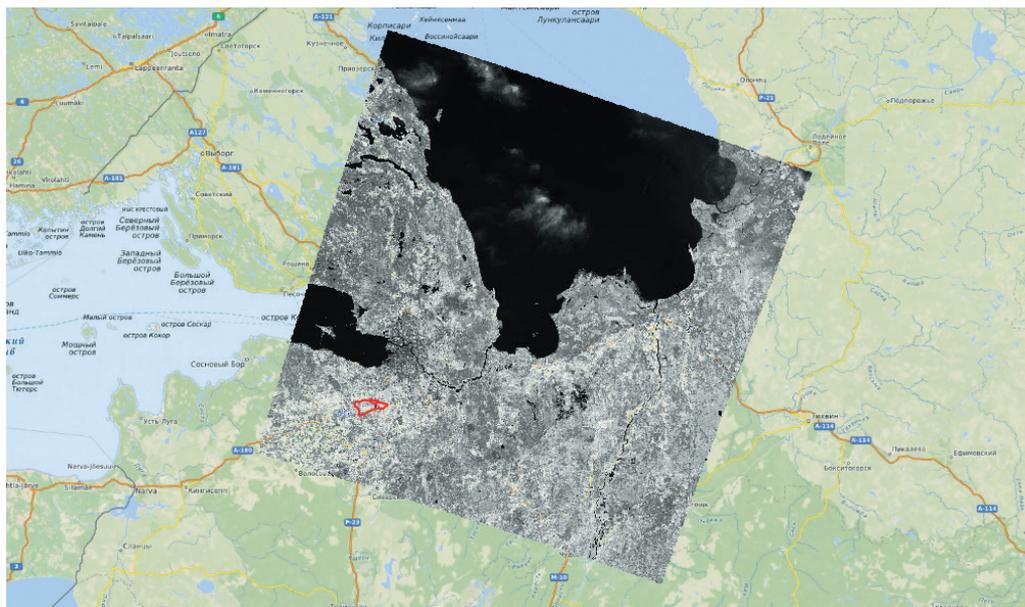


Рис. 3. Пример использованного снимка со спутника Landsat-8 территории водосборов Дудергофских озер (выделена контуром).

снимки за лето 2018 г. и осень 2017 г. Пространственное разрешение всех снимков составляет 30 м на пиксель (рис. 3).

Для шести дешифрируемых классов подстилающей поверхности (табл. 1) были выделены векторные эталоны. Путем сэмпинга растров для дальнейшего процесса классификации были выбраны каналы Landsat-8 с 3-го по 7-й включительно, в которых классифицируемые объекты были наиболее контрастными. Далее в программе ScanEx ImageProcessor версии 4.2 спутниковые изображения были разбиты на 40 кластеров (число подобрано эмпирически) методом неуправляемой классификации IsoData с последующим экспертным объединением кластеров в итоговые классы. Эталоны использовались для контроля результата классификации. Результаты дешифрирования представлены на рис. 4 и в табл. 1.

В соответствии с результатами выполненных ранее исследований [1, 2, 28] значения концентрации общего фосфора в почвенных водах и первичных звеньях гидрографической сети для различных типов поверхности принимались приближенно равными 0,05 мг/л для естественных территорий (лесов), 0,08 мг Р/л для полей и лугов, не задействованных в настоящее время в сельскохозяйственном производстве, 0,20 мг/л для урбанизированных территорий и асфальтовых покрытий, 0,12 мг/л для смешанных территорий и внутриквартальной растительности. Указанные значения ранее использовались в расчетах по модели *ILLM*, в том числе и для получения материалов, занесенных в базы данных ХЕЛКОМ [25].

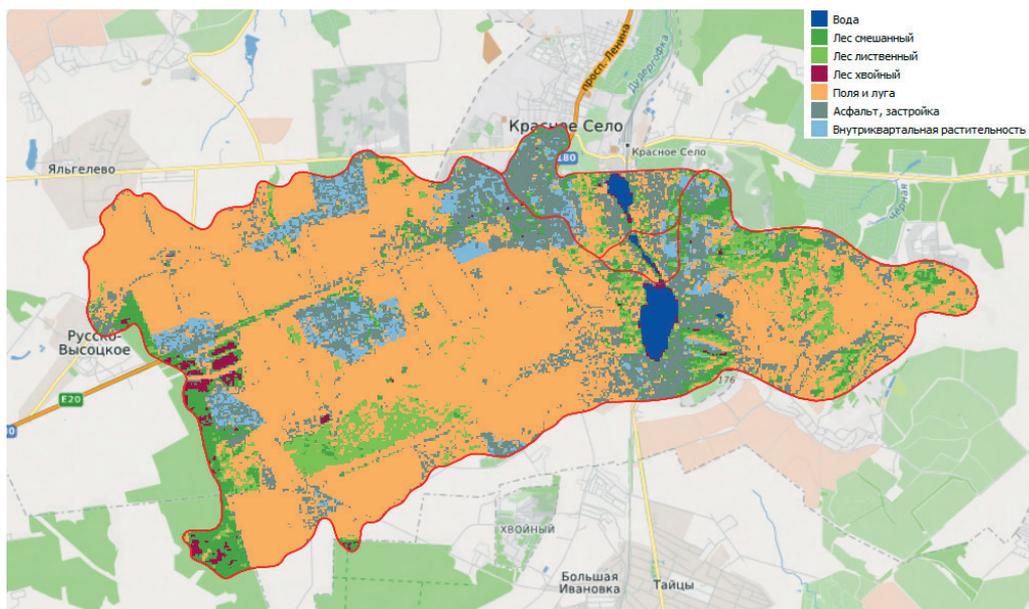


Рис. 4. Типы подстилающей поверхности на водосборе Дудергофских озер.

Таблица 1

Площадь (га) различных типов подстилающей поверхности водосбора Дудергофских озер (по результатам автоматизированной классификации спутниковых изображений)

Тип поверхности	Озеро			Система в целом
	Дудергофское	Долгое	Безымянное	
Лес смешанный	386	13	34	433
Лес лиственный	388	6	22	416
Лес хвойный	53	2	3	58
Поля и луга	3305	25	76	3406
Застройка, асфальт, лишенные почвенно-растительного покрова участки местности	796	24	161	981
Внутриквартальная растительность, сады, смешанные территории	237	7	27	271
Общая площадь	5165	77	323	5565

При расчетах внешней биогенной нагрузки на Дудергофские озера особое внимание уделено нагрузке, сформированной в результате сельскохозяйственной деятельности. По результатам обработки данных глобальной системы космического наблюдения было получено, что в границах водосбора Дудергофского озера возделывается около 2280 га сельскохозяйственных земель, преимущественно занятых для выращивания многолетних трав на корм и картофеля. Данная площадь составляет около 35—38 % общей площади водосбора Дудергофского озера. Основная часть возделываемых сельскохозяйственных земель сосредоточена

в центральной и юго-западной частях водосбора. Через сельскохозяйственные территории водосбора не протекает крупных водотоков, впадающих в Дудергофские озера.

К наиболее крупным животноводческим и птицеводческим объектам, расположенным в границах водосбора, относятся птицефабрика «Русско-Высоцкая» (координаты 59,70577° с.ш., 29,94632° в.д.) и ЗАО «Красносельский» (координаты 59,72174° с.ш., 29,94855° в.д.), краткая характеристика которых приведена в табл. 2.

Таблица 2

Краткая характеристика птицефабрики «Русско-Высоцкая» и ЗАО «Красносельский»

Птицефабрика	Специализация	Поголовье	Количество навоза/помета, т/год	Содержание фосфора в навозе/помете, т/год
«Русско-Высоцкая»	Птицеводство	Около 400 000	29 200	61,32
ЗАО «Красносельский»	Крупный рогатый скот	1200	30 600	24,48

Изучение спутниковых снимков показало отсутствие в ЗАО «Красносельский» герметичных навозохранилищ, что может вести к загрязнению поверхностных и грунтовых вод. Однако места складирования навоза находятся на расстоянии около 9,5 км от озера Дудергофского. На птицефабрике «Русско-Высоцкая» имеются помехохранилища, но их состояние не обеспечивает полной герметизации и гарантированной защиты от протекания жидких пометных стоков. Помехохранилища находятся на расстоянии 7,8 км от озера. Оба описанных объекта находятся на юго-западе водосбора. В западной части водосбора, вблизи населенного пункта Лаголово, остались заполненные помехохранилища ранее действующей птицефабрики «Лаголово». Координаты помехохранилищ 59,69004° с.ш., 30,01623° в.д. и расположены они на расстоянии 5,5 км от озера Дудергофского.

Большая часть сельскохозяйственных земель находится на расстоянии более 2 км от озера, и только 16 % (375 га) сельхозплощадей — на расстоянии от 1 до 2 км. На расстоянии менее 1 км используемые сельскохозяйственные земли практически отсутствуют. Почвы сельскохозяйственных земель на водосборе озера Дудергофского преимущественно дерново-подзолистые и дерново-карбонатные, по механическому составу преимущественно тяжелые; на юге водосбора встречаются участки с легкими по механическому составу почвами.

Важными факторами для оценки биогенной диффузной нагрузки на водные объекты при ведении сельскохозяйственной деятельности являются показатели использования минеральных и органических удобрений. При этом важно учитывать типы используемых удобрений, концентрацию питательных элементов и технологии их применения. При работе с органическими удобрениями большое значение для выноса питательных веществ имеет порядок соблюдения технологических регламентов [3, 5, 19].

Образование и использование органических удобрений определяется путем нормативного расчета выхода навоза и помета при содержании сельскохозяйственных животных с учетом современных систем содержания и технологий

навозоудаления. При расчете использовались Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета, разработанные в ФГБНУ ИАЭП [4, 19, 20].

Средний показатель использования фосфора на сельскохозяйственные площади сельхозугодий водосбора составляет 34,6 кг/га. Данный показатель является усредненным для сельхозплощадей Ломоносовского района Ленинградской области.

Для расчета диффузной нагрузки площадь сельхозземель была условно поделена на три категории в зависимости от расстояния до Дудергофского озера: 1-я — от 1 до 2 км, 2-я — от 2 до 5 км и 3-я — от 5 до 10 км. Согласно результатам расчета, представленным в табл. 3, годовая диффузная фосфорная нагрузка, сформированная в границах водосбора озера Дудергофского при ведении сельскохозяйственной деятельности, составляет 1,03 т/год. Поскольку сельхозземли имеются только на водосборе Дудергофского озера, полученное значение относится ко всей водосборной территории Дудергофских озер. При условии освоения наилучших доступных технологий (НДТ) использования питательных элементов в сельскохозяйственном производстве годовое поступление на водосбор озер составит 0,95 т/год.

Таблица 3

Диффузная фосфорная нагрузка на Дудергофские озера, сформированная сельскохозяйственными источниками

Площади сельхозземель в пределах водосбора	Площадь, га	$P_{\text{общ}}$	
		кг/га	т/год
1-я категория: 1 — 2 км	375	1,20	0,45
2-я категория: 2 — 5 км	510	0,48	0,24
3-я категория: 5 — 10 км	1395	0,24	0,33
Итого	2280	—	1,03

Официальным источником информации о нагрузке, сформированной точечными сбросами сточных вод, являются формы статистической отчетности 2ТП (водхоз), в соответствии с которыми на рассматриваемой территории имеется всего два источника — это водонапорная станция Дудергофская и ОАО Термопласт. Согласно данным 2ТП (водхоз), сбросы фосфора отсутствуют. Таким образом, можно считать, что фактически нагрузка в данном случае формируется только диффузными источниками.

Атмосферные выпадения могут рассчитываться как с помощью методов математического моделирования атмосферного переноса примесей, так и по результатам непосредственных измерений химического состава жидких и твердых атмосферных выпадений. В настоящей работе для расчетов фосфорной нагрузки на водосбор Дудергофских озер за счет атмосферных выпадений использовалось значение $9 \text{ кг}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$.

Как правило, большая часть биогенных веществ, поступивших на водосбор от различных источников, не достигает замыкающих створов крупных рек, так как удерживается водосбором и различными звеньями гидрографической сети.

В результате итоговая нагрузка на водный объект составляет лишь часть поступления биогенных веществ на водосбор. Для расчета коэффициента удержания R использовалась следующая эмпирическая формула [12, 14, 22]:

$$R = \left(1 - \frac{1}{1 + aq^b} \right),$$

где q — модуль стока (л/(км²·с)); a и b — безразмерные эмпирические параметры, значения которых составляют 13,3 и –0,93 соответственно. Значение модуля стока q связано со слоем стока y (мм/год) соотношением $q = 0,03171y$.

Фоновая (естественная, природная) фосфорная нагрузка формируется за счет выноса с необрабатываемых земель, а также выноса с обрабатываемых земель, который происходит независимо от сельскохозяйственной деятельности. При проведении расчета фоновой нагрузки на водосбор из рассмотрения исключаются все антропогенные источники загрязнения (точечные сбросы, вынос с сельскохозяйственных и урбанизированных территорий).

Результаты расчетов фосфорной нагрузки на всю систему Дудергофских озер, а также на самое крупное озеро системы — Дудергофское — со стороны водосбора для года средней водности со слоем стока 300 мм/год (9,5 л/(км²·с)) приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета формирования
фосфорной нагрузки (т/год) на систему Дудергофских озер
для средней водности ($y = 300$ мм/год) в современных условиях

Характеристика	Система озер	оз. Дудергофское
Суммарная нагрузка на водосбор	2,621	2,426
Удержание водосбором и его гидрографической сетью	1,627	1,506
Нагрузка на озеро	0,994	0,920
Фоновая (природная) составляющая нагрузки	0,507	0,470

Расчеты внешней фосфорной нагрузки на систему из трех Дудергофских озер показали, что в условиях средней водности на поверхность изучаемого водосбора поступает 2,621 т/год. Водосбором и его гидрографической сетью удерживается 1,627 т/год. Нагрузка на акваторию озер с водосбора составляет 0,994 т/год, фоновая или природная нагрузка — 0,507 т/год. Внешняя фосфорная нагрузка на самое крупное Дудергофское озеро составляет 92,6 % суммарного значения нагрузки на всю озерную систему. Учитывая тот факт, что на водосбор этого озера приходится 92,8 % общей площади водосбора озерной системы, можно утверждать, что внешняя фосфорная нагрузка на озера системы пропорциональна площади их водосборов, несмотря на то что все сельскохозяйственные предприятия расположены на водосборе озера Дудергофского. Однако внешняя фосфорная нагрузка на единицу площади озера Дудергофского превышает соответствующее значение для озер Долгого и Безымянного в пять раз, составляя 1,333 и 0,264 г/(м²·год) соответственно.

Полученные результаты представляют собой приближенную оценку внешней фосфорной нагрузки на Дудергофские озера, так как для их получения использован ряд достаточно серьезных предположений по преодолению дефицита исходной информации.

Однако, как было указано выше, фосфорный запас в водной массе формируется в результате суммарного вклада внешней и внутренней фосфорной нагрузки.

Внутренняя фосфорная нагрузка

Оценка внутренней фосфорной нагрузки на Дудергофские озера была выполнена на основе данных натуральных наблюдений по методу, разработанному в Институте озераведения РАН (Свидетельство о государственной регистрации № 2017618854 от 10.08.2017). В основу метода положена балансовая модель основных потоков фосфора в пограничной зоне осадок — вода. Ранее данный метод был успешно применен для оценки внутренней биогенной нагрузки на Ладожское, Псковско-Чудское и Нижнее Суздальское озера, Финский залив и Сестрорецкий Разлив [6, 8, 10, 13, 26, 27].

Отбор ненарушенных кернов донных отложений Дудергофских озер был произведен с использованием стратометра в центральных частях водоемов в октябре 2018 г. Для изучения вертикального распределения фосфора были отобраны колонки осадка мощностью 15 см. Каждая колонка была разделена на девять слоев толщиной от 0,2 до 5 см. Определение содержания общего фосфора в осадках выполнялось по методу Мета в модификации М. В. Мартыновой и Н. А. Шмидеберг [17]. В тех же точках были отобраны пробы верхнего слоя донных отложений (0—2 см) для определения пористости (p) осадка и плотности сухого осадка ($d_{\text{сух}}$). Соответствующие значения p и $d_{\text{сух}}$ составили в озере Дудергофском 0,97 и 2,9 г/см³, в озере Долгом 0,95 и 2,6 г/см³, в озере Безымянном 0,94 и 2,5 г/см³.

Для оценки скорости современного осадконакопления, необходимой для расчета плотности потоков, в озере Безымянном был отобран ненарушенный керн донных отложений мощностью 30 см, разделенный на 34 слоя толщиной от 0,5 до 2 см. Величина скорости осадконакопления, оцененная по изотопу ²¹⁰Pb в СПбГУ, составляет 2,6±0,2 мм/год.

Содержание общего фосфора в твердой фазе донных отложений варьирует в интервалах 0,43—1,31, 0,87—1,24 и 0,77—1,26 мг/г (здесь и далее расчет сделан на воздушно-сухую навеску, в.с.н.) в озерах Дудергофском, Долгом и Безымянном соответственно. Из рис. 5 видно, что вертикальное распределение фосфора в осадках трех озер заметно различается. Наиболее типичный профиль, в первом приближении представляющий собой кривую, экспоненциально убывающую с глубиной в осадке, характерен только для озера Дудергофского — верхнего водоема в системе озер. В озере Долгом в целом также отмечена тенденция уменьшения содержания $P_{\text{общ}}$ с глубиной в осадке, однако существенная убыль $P_{\text{общ}}$ наблюдается только в пределах верхнего 2-сантиметрового слоя. В озере Безымянном — нижнем водоеме в каскаде озер — профиль концентрации $P_{\text{общ}}$ представляет собой кривую с подповерхностным максимумом в слое 1—2 см и

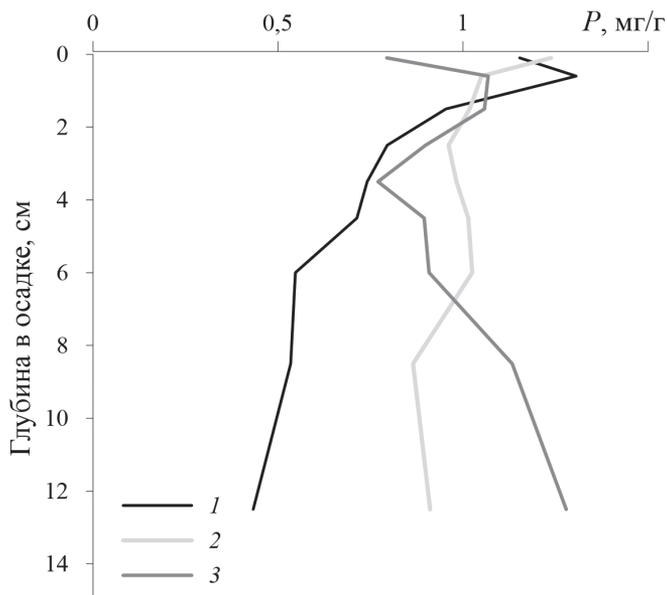


Рис. 5. Вертикальное распределение содержания общего фосфора (P мг/г в с.н.) в твердой фазе донных отложений озер.

1 — озеро Дудергофское, 2 — озеро Долгое, 3 — озеро Безымянное.

локальным минимумом в слое 3—4 см, глубже которого в целом отмечена тенденция увеличения содержания $P_{\text{общ}}$. Такой характер вертикального профиля свидетельствует о существенных изменениях в условиях осадконакопления в озере, происходивших в течение последних 60 лет (период накопления 15-сантиметрового слоя осадка). Очевидно, важнейшим фактором, определявшим изменения условий осадконакопления, являлось изменение гидрологического режима нижних озер, подпруженных плотинами.

Расчитанные значения плотности потоков седиментации, захоронения в толще осадка и поступления фосфора со дна в водную массу озер представлены в табл. 5. Наибольшая величина потока фосфора зафиксирована из донных

Таблица 5

Плотность потоков седиментации (S), захоронения (B) в толще осадка и поступления (J) фосфора из донных отложений в водную массу, а также удержание фосфора в донных отложениях (B/S) Дудергофских озер

Характеристика	Озеро		
	Дудергофское	Долгое	Безымянное
S , г/(м ² · год)	0,294	0,402	0,347
B , г/(м ² · год)	0,098	0,296	0,250
J , г/(м ² · год)	0,197	0,106	0,097
B/S , %	33	74	72

отложений озера Дудергофского. При этом степень удержания (B/S) фосфора в осадках этого озера наименьшая: здесь захоранивается только треть осевшего на дно фосфора, тогда как в озерах Долгом и Безымянном в осадках накапливается почти три четверти седиментировавшего фосфора. Абсолютные величины плотности потоков фосфора со дна (J) озер Долгого и Безымянного вдвое меньше плотности потока в озере Дудергофском.

С учетом площади озер ежегодно из донных отложений в водную массу озера Дудергофского поступает 140 кг фосфора, озера Долгого — 10 кг фосфора, озера Безымянного — 18 кг фосфора. Таким образом, ориентировочная оценка современной внутренней фосфорной нагрузки на систему Дудергофских озер составляет 0,168 т Р/год.

Выводы

По результатам математического моделирования в сочетании с данными спутниковой съемки водосбора получено, что в условиях средней водности на поверхность водосбора Дудергофских озер поступает 2,621 т/год фосфора. Водосбором и его гидрографической сетью удерживается 1,627 т/год, нагрузка на акваторию озер с водосбора составляет 0,994 т/год, фоновая, или природная нагрузка — 0,507 т/год. Сельскохозяйственные предприятия, расположенные на водосборе озера Дудергофского — птицефабрика «Русско-Высоцкая» и ЗАО «Красносельский», не оказывают существенного влияния на формирование нагрузки на озеро. В результате внешняя фосфорная нагрузка на озера системы пропорциональна их водосборным площадям. Однако нагрузка на единицу площади Дудергофского озера, характеризующегося наибольшим удельным водосбором, пятикратно превышает нагрузку для озер Долгого и Безымянного (1,333 и 0,264 г/(м² · год) соответственно).

Современный уровень внутренней фосфорной нагрузки на систему Дудергофских озер ориентировочно оценивается значением 0,168 т/год, что составляет 14,5 % суммарной фосфорной нагрузки на систему озер. Приведенные цифры свидетельствуют об определяющем влиянии внешней фосфорной нагрузки на экологическое состояние изучаемых водных объектов, что закономерно, учитывая невысокий трофический статус озер. На долю Дудергофского озера приходится 83 % суммарной внутренней фосфорной нагрузки на систему озер. Плотность потока фосфора со дна Дудергофского озера в два раза выше осредненного значения для двух других озер системы, причем удерживающая способность его донных отложений по отношению к фосфору в 2,2 раза ниже.

Выполненная оценка фосфорной нагрузки, представляющей собой сумму внешней и внутренней нагрузки, на Дудергофское озеро составляет 1,530 г/(м² · год), а на озера Долгое и Безымянное — 0,364 г/(м² · год), т.е. в 4,2 ниже. Полученная информация может служить объяснением того, что Дудергофское озеро характеризуется наихудшими показателями качества воды из числа трех озер рассматриваемой системы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме №0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

Список литературы

1. Алябина Г.А., Сорокин И.Н. Миграция фосфора и органического вещества в системе «водоем — водосборная площадь» // Экологическая химия. 1997. № 6 (3). С. 166—171.
2. Алябина Г.А., Сорокин И.Н. Особенности формирования внешней нагрузки на водные объекты в урбанизированных ландшафтах // Известия РГО. 2001. № 133 (1). С. 81—87.
3. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Методика укрупненной оценки суточного и годового выхода навоза/помета // Молочнохозяйственный вестник. 2014. № 1 (13). С. 78—85.
4. Брюханов А.Ю. Рекомендации по обоснованию экологически безопасного размещения и функционирования животноводческих и птицеводческих предприятий / Международный агропромышленный конгресс перспективы инновационного развития агропромышленного комплекса и сельских территорий: материалы для обсуждения. СПб, 2014. С. 48—49.
5. Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Обломкова Н.С., Оглуздин А.С., Субботин И.А. Методика определения биогенной нагрузки на водные объекты от сельскохозяйственного производства // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 89. С. 175—183.
6. Водные объекты Санкт-Петербурга / Под ред. С.А. Кондратьева и Г.Т. Фрумина. СПб: Символ, 2002. 348 с.
7. Голосов С.Д. Тепломассоперенос в мелководном стратифицированном водоеме / Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб, 1993. 24 с.
8. Игнатьева Н.В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме / В кн.: Ладожское озеро — прошлое, настоящее, будущее. СПб: Наука, 2002. С. 148—157.
9. Игнатьева Н.В. Оценка потоков фосфора в пограничной зоне осадок — вода в Псковско-Чудском озере // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 34. С. 71—78.
10. Игнатьева Н.В. Особенности динамики биогенных элементов в карбонатных водах в условиях урбанизированного ландшафта (на примере Дудергофской системы, г. Санкт-Петербург) / Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод. Ч 1. Материалы науч. конф. с междунар. участием, Ростов-на-Дону, 8—10 сентября 2015 г. Ростов-на-Дону, 2015. С. 54—58.
11. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб: Наука, 2007. 255 с.
12. Кондратьев С.А., Казмина М.В., Шмакова М.В., Маркова Е.Г. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты // Региональная экология. 2011. № 3—4. С. 50—59.
13. Кондратьев С.А., Игнатьева Н.В., Каретников С.Г. Внешняя и внутренняя фосфорная нагрузка на водоем на примере водохранилища Сестрорецкий Разлив // Региональная экология. 2016. № 4 (46). С. 59—70.
14. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Викторова Н.В., Еришова А.А., Обломкова Н.С. К оценке биогенного стока в Финский залив Балтийского моря // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 51. С. 109—120.
15. Мартынова М.В. Азот и фосфор в донных отложениях озер и водохранилищ. М.: Наука, 1984. 160 с.
16. Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 2010. 243 с.
17. Мартынова М.В., Шмидеберг Н.А. О методах определения различных форм фосфора в донных наносах // Гидрохимические материалы. 1983. Т. 85. С. 49—55.
18. Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Тарбаева В.М., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Воробьева Е.А., Обломкова Н.С. Обоснование выполнения рекомендаций Хелком по снижению

- биогенной нагрузки на финский залив со стороны России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Геология. География. 2016. № 4. С. 53—65.
19. РД-АПК 1.10.15.02-2008 Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета. Минсельхоз РФ. М., 2008. 93 с.
 20. Рекомендации по организации и проведению производственного экологического контроля систем переработки и использования навоза (помета). Порядок разработки Технологического регламента / А.Ю. Брюханов, Д.А. Максимов, Х. Хухта, Э.В. Васильев, В.Б. Минин, И.А. Субботин. СПб: изд-во СЗНИИМЭСХ, 2012. 53 с.
 21. *Хрисанов Н.И., Осинцов Г.К.* Управление эвтрофированием водоемов. СПб: Гидрометиздат, 1993. 278 с.
 22. *Behrendt H., Dannowski R.* Nutrients and heavy metals in the Odra River system. Weissensee Verlag Publ., 2007. 337 p.
 23. Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control / OECD Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control). Paris, 1982. 155 p.
 24. Guidelines for the annual and periodical compilation and reporting of waterborne pollution inputs to the Baltic Sea (PLC-Water): HELCOM Publ., Helsinki. 2015. 143 p.
 25. HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2007. 103 p.
 26. *Ignatieva N.V.* Nutrient exchange across the sediment-water interface in the eastern Gulf of Finland // Boreal Environment Research. 1999. V. 4. P. 295—305.
 27. *Ignatyeva N.* Role of bottom sediments in phosphorus cycling under changing external load on Lake Ladoga // Proc. 9th Int. Conf. Conservation and Management of Lakes — BIWAKO 2001. Otsu, Shiga, Japan, 2001. P. 567—570.
 28. *Rekolainen S.* Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland // Aqua Fennica. 1989. 19 (2). P. 95—107.