

Соу Амаду Диюлде
sowamadoudjould@mail.ru
РГПУ им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ КОЛИЧЕСТВОМ ПОСТУПЛЕНИЯ ФОСФОРА В ФИНСКИЙ ЗАЛИВ И РЕАКЦИЕЙ ВОДОЕМА

Аннотация: *Статья посвящена проблеме загрязнения Балтийского моря биогенными веществами из водораздела реки Новой. Целью исследования является оценка диффузной биогенной нагрузки, поступающей из водосбора реки Новая. В первом разделе описывается теоретическая основа явления эвтрофирования, затем рассматриваются ситуация и характеристики реки Новой. В заключении исследуется используемая математическая модель, показывающая, что максимально допустимый экспорт фосфора и азота в Финский залив значительно превышает общую нагрузку на реку Новую со стороны её водосбора.*

Ключевые слова: *эвтрофирование, биогенная нагрузка, водоем, река Новая.*

Введение. Гидросфера функционирует как естественный резервуар для большинства загрязняющих веществ, попадающих в атмосферу и литосферу. Вода, используемая в различных отраслях, таких как промышленность, сельское хозяйство и домашнее хозяйство, подвергается непосредственному антропогенному воздействию, которое приводит к загрязнению. В то же время, вода является природной средой обитания для гидробионтов и поддерживает динамическое равновесие в обмене биогенными веществами с водной экосистемой. Присутствие инородных загрязняющих веществ в водной среде негативно влияет на жизнедеятельность отдельных организмов и на функционирование целостной водной экосистемы.

Эвтрофирование представляет собой процесс увеличения биологической продуктивности водоемов из-за накопления биогенных

элементов, как в результате антропогенных, так и природных факторов. Согласно стандарту ГОСТ 17.1.1.01-77, это явление определяется как повышение биологической продуктивности водоемов, вызванное накоплением биогенных веществ.

Наиболее значимыми источниками загрязнения водоемов являются смывы азотных и фосфорных удобрений, строительство водохранилищ без адекватной очистки, а также сброс сточных вод, даже прошедших биологическую очистку. Биогенные компоненты могут поступать в экосистемы как через водные, так и воздушные потоки; например, мировое потребление моющих средств, содержащих фосфаты, превышает 30 млн тонн в год. В Канаде один из химиков получил престижную национальную награду за разработку моющих средств без фосфора.

Процесс эвтрофирования активизируется под воздействием двух ключевых биогенных элементов — азота и фосфора. Среди множества элементов, влияющих на этот процесс (таких как кислород, углерод, сера и другие), для водоемов умеренного климата основную роль играет фосфор.

Хотя эвтрофирование является естественным процессом эволюции водоёмов, его ускорение под влиянием человеческой деятельности придаёт ему антропогенные характеристики. Например, если в естественных условиях эвтрофирование одного водоёма занимает более 1000 лет, то антропогенное воздействие может привести к этому процессу в сотни и тысячи раз быстрее. Крупные водоёмы, такие как Балтийское море, озера Эри, Тахо и Ладожское, совершили переход в новое трофическое состояние всего за 20-25 лет, что затронуло многие значимые пресноводные озера в Европе и США (Фруммин, Хуан, 2012, с.5) [6].

Биогенное загрязнение, возникающее в результате человеческой деятельности на водосборных территориях рек и внутри самих рек, как например, при строительстве каскадов гидроэлектростанций, создании водохранилищ, организации рекреационных мероприятий или судоходства, становится причиной антропогенного эвтрофирования. Этот процесс

особенно активно проявляется в водоемах, где хозяйственная деятельность, включая сельскохозяйственное производство (культивирование пропашных культур, сенокосов и пастбищ) и животноводство (различные фермерские комплексы), осуществляется на значительных площадях. Учитывая, что эти источники биогенной нагрузки нередко остаются неадекватно контролируемые, они требуют особого внимания. В ту же категорию биогенной нагрузки входят и воздействия, связанные с увлечением водными видами отдыха.

В последние годы проблема биогенного загрязнения водоемов, включая реки, озера и водохранилища, а также сопутствующее эвтрофирование, превращается в одну из ключевых задач охраны водных ресурсов. Это явление наблюдается во многих странах, включая Россию. Учитывая серьезность проблемы эвтрофирования как глобального экологического вызова, ЮНЕСКО начала проводить работы по мониторингу внутренних вод и контролю за эвтрофированием водоемов по всему миру (Хрисанов, Осипов, 1993, с. 3) [7].

Особое внимание к данной проблеме привлекает наличие трансграничных водоемов на территории России и соседних стран, таких как Чудско-Псковский озерный комплекс, река Нарва, Финский залив и Куршский залив Балтийского моря. Эти водные объекты требуют комплексного подхода к их охране и управлению, учитывая их значимость для экологической системы и необходимость сотрудничества между государствами для предотвращения эвтрофирования и загрязнения (Фрумин, 2013) [8].

Цель данного исследования заключалась в оценке диффузной биогенной нагрузки, оказываемой водосбором реки Новой, на саму реку. Участки верховья и части среднего течения реки располагаются в зоне активного сельского хозяйства, где сельскохозяйственные угодья занимают 2900 гектаров, из которых значительная доля — 90%, или 2600 гектаров — отведена под пашни. Эти земли представляют собой определённую угрозу для гидросистемы из-за возможности смыва обработанной почвы в систему гидромелиорации, что, в свою очередь, может привести к попаданию этих

веществ в русло реки Новой. Поля служат источником постоянного поступления химических элементов в водную экосистему, что происходит через вымывание дождями удобрений и пестицидов.

Кроме того, состояние реки Новой значительно ухудшается под воздействием объектов на урбанизированных территориях. Строения и инфраструктура занимают преобладающую часть водосборной области, составляя около двух-thirds её площади. В данном административном районе почти 54 км² отведены под городские объекты, в то время как менее 2 км² занимают сельские населённые пункты, и лишь 0,5 км² — отдельные здания и сооружения, что составляет 65%, 2% и 0,6% соответственно.

Водосбор реки Новой расположен в юго-западной части Кировского района Санкт-Петербурга и прилегающей к нему части Красносельского района (рис. 1).



Рис. 1. Результаты первичной интерактивной классификации водосбора реки Новой по категориям земель

Показатели, характеризующие водосбор:

- Площадь водосбора составляет – 9,7 км²
- Акватория прудов – разливов в пределах Кировского района Санкт-Петербурга составляет 0,1%.
- В площадь водосбора входят земли мегаполиса – 65,1%.
- Других населенных пунктов – 0,03%.
- Земли промышленности и иного специального назначения составляют 0,27 %.
- Сельскохозяйственные угодья – 34,9%.
- Земли лесного фонда составляют - 2,1%.
- Железные дороги – 15 км.
- КАД – 11,4 км.
- Другие шоссейные – 25 км.
- Дороги полевые, лесные другие специального назначения – 28 км

Для решения задачи о расходе воды в реке Новая было применено следующее уравнение [Фрумин, 2013] [8]:

$$R = 0,0089 \cdot F, \quad (1)$$

где R – расход воды для площади водосборного бассейна ≤ 500 км², м³/с; F – площадь водосборного бассейна, км².

Для реки Новой $F = 10,26$ км². Тогда среднегодовой расход $R = 0,091$ м³/с.

Согласно [Догановский, Малинин, 2004] [2] существуют достаточно тесные связи между площадью бассейна и длиной главной реки:

$$F = aL^n, \quad (2)$$

где a и n – географические параметры. Например, для европейской части России $a = 0,58$, $n = 1,75$. Длина реки Новой $L = 5$ км, тогда $F = 9,7$ км². Эта величина была использована при последующих расчётов.

Материалы и методы исследования

В ходе исследования были применены различные показатели для анализа. В качестве первого показателя использовались данные о содержании фосфора (P_2O_5 ,%) в почвах водосборного бассейна реки Новой. Для этого было отобрано и проанализировано 120 образцов, каждый из которых занимал площадь 100 м². Статистическая обработка полученных данных выявила следующие результаты: среднее содержание P_2O_5 составило 0,206655%, максимальное значение достигло 0,482022%, а минимальное — 0,097119%. Стандартная ошибка составила 0,0739%. По результатам пересчёта было установлено, что в проанализированных почвах водосбора реки Новой (площадь 0,012 км²) содержание фосфора составляет 0,108 кг (что равно 0,09% фосфора). Таким образом, общее содержание фосфора в почвах всего водосбора реки Новой (9,7 км²) оценивалось примерно в **0,087 тонн**.

Для ориентировочной оценки содержания азота в почвах водосбора реки Новой был использован подход, включающий сопоставление концентраций 15 химических элементов, идентифицированных в обследованных почвах, с их кларками, т.е. распространённостью в среде [Кист, 1987] [1] (Табл. 1).

Таблица 1. Содержание химических элементов в почвах водосбора реки Новой (С) и кларки, мг/кг

Элемент	Кларк	Содержание	Элемент	Кларк	Содержание
S	850	442,6	Ga	30	14,8
Sc	7	9,27	As	5	3,2
V	100	85,6	Rb	100	125,7
Cr	200	52,9	Sr	300	154,5
Co	8	6,92	Ba	500	654,9
Ni	40	23,3	La	40	49,1

Cu	20	23,1	Pb	10	28,5
Zn	50	86,4	-	-	-

По данным, приведённым в табл. 1, была установлена следующая зависимость (см. также рис. 2):

$$\ln C = 0,401 + 0,865 \ln[\text{Кларк}] \quad (3)$$

$$n = 15; r = 0,926; r^2 = 0,857; \sigma_{y(x)} = 0,584; F_p/F_T = 17,0$$

Здесь n – количество химических элементов, r – коэффициент корреляции, r^2 – коэффициент детерминации, $\sigma_{y(x)}$ – стандартная ошибка, F_p/F_T – отношение расчётного значения критерия Фишера к табличному при уровне значимости 95%.

Математическая модель, представленная в уравнении (3), подтвердила свою адекватность, так как выполняется неравенство ($F_p > F_T$), что позволяет использовать данную модель для прогнозирования содержания различных химических элементов в почвах водосбора реки Новой, поскольку отношение F_p/F_T превышает 4 [Малинин, Гордеевас, 2009, с. 24] [6].

Согласно данным, представленным в работе [Кист, 1987] [1], распространённость азота в почвах оценивается в 1000 мг/кг. Подставляя это значение в уравнение (3), можно определить содержание азота в почвах одного образца водосбора реки Новой как 588 мг/кг (или 0,061%). Для всего водосбора эта оценка составит примерно 0,057 тонн, однако данный результат следует рассматривать как ориентировочный и актуальным для дальнейшей экспериментальной проверки

Кроме того, стоит отметить, что валовое содержание азота в почвах варьируется от 0,02 до 0,05% в дерново-подзолистых песчаных почвах до 0,2-0,5% в черноземах.

Вторым показателем, применённым в расчётах, стало количество атмосферных осадков (рис. 2). В частности, общее количество осадков в Санкт-Петербурге за 2018 год составило 530 мм.

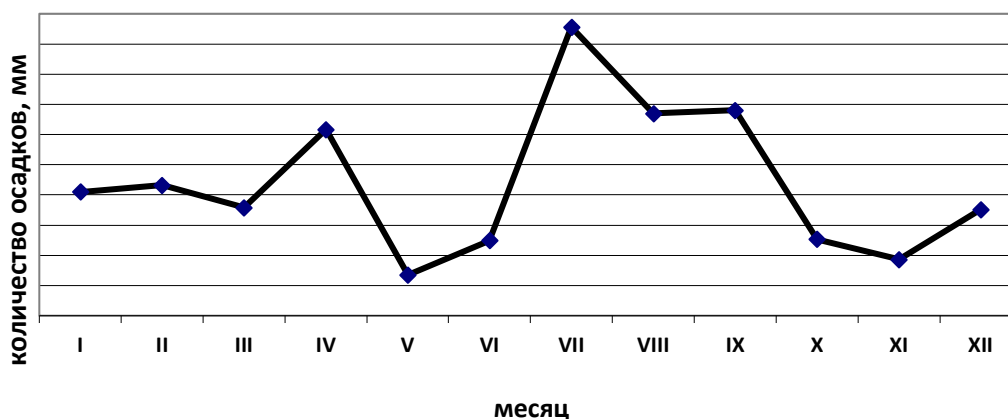


Рис. 2. Динамика внутригодового количества осадков в Санкт-Петербурге в 2018 г.

Как правило, значительная часть биогенных веществ, поступающих на водосборные территории из различных источников, не достигает выходных точек крупных рек, поскольку они задерживаются самими водосборами и различными элементами гидрографической сети. Вследствие этого итоговая нагрузка на водный объект оказывается лишь частью общего объема биогенных веществ, поступившего на водосбор.

Расчёты проводились с использованием модели ILLM — Institute of Limnology Load Model (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612519 от 27.02.2014), разработанной в Институте озераедения РАН. Эта модель базируется на как отечественном, так и зарубежном опыте моделирования выноса биогенных веществ с территории водосборов [Кондратьев и др., 2011; Behrendt, 2007] [4]. Кроме того, были учтены рекомендации ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты в бассейне Балтийского моря [Guidelines, 2005] [5].

Таблица 2. Диффузная биогенная нагрузка со стороны водосбора реки Новой

Биогенный элемент	Общая нагрузка, кг/год	Фоновая нагрузка кг/год	Антропогенная нагрузка, кг/год
Фосфор общий	72	10	62

Азот общий	66*	-	-
------------	-----	---	---

Примечание. *Результат следует рассматривать как ориентировочный.

В исследовании, представленном в работе (Фрумин, 2013) [3], указаны пределы допустимого поступления (экспорта) и максимальные уровни стока биогенных элементов для субакваторий Балтийского моря, что представлено в Таблице 3. Эти данные позволяют оценить экологическую нагрузку на данный водоем и выявить ключевые области для мониторинга и управления водными ресурсами в регионе.

Таблица 3. Максимально допустимый экспорт и максимально допустимые модули стока биогенных элементов на субакватории Балтийского моря

Субакватория	Площадь водосбора, F, км ²	Максимально допустимое поступление, тонн·год ⁻¹		Максимально допустимый модуль стока, кг·км ⁻² ·год ⁻¹	
		Фосфора общего Q(TP) ^{МАК}	Азота общего Q(TN) ^{МАК}	Фосфора общего M(TP) ^{МАК}	Азота общего M(TN) ^{МАК}
Ботнический залив	259620	2585	51436	9,96	198
Ботническое море	224910	2457	56786	10,9	253
Центральная Балтика	496185	6746	233259	13,6	470
Финский залив	413100	4860	106680	11,8	258
Рижский залив	102040	1430	78403	14,0	768
Датские проливы	27365	1409	30893	51,5	1129
Каттегат	79530	1573	44257	18,8	556

Заключение

Анализ данных, представленных в Таблице 5, показывает, что максимально допустимые уровни экспорта биогенных элементов в Финский залив составляют 4860 тонн в год для общего фосфора и 106680 тонн в год для общего азота. Эти значения значительно превышают общую нагрузку на

реку Новую, исходящую из её водосбора, которая составляет лишь 0,072 тонны в год для общего фосфора и 0,066 тонны в год для общего азота. Это подчеркивает важность мониторинга и управления биогенными веществами, чтобы обеспечить экологическую устойчивость как рек, так и морских экосистем в данном регионе.

Литература

1. Геохимия окружающей среды. Практикум / Сост.: М.М. Мансуров. Санкт-Петербург : РГГМУ, 2022. 48 с.

2. Каменсков, Ю. И. Характеристики речной сети юго-востока Западной Сибири // Вопросы географии Сибири: Сборник статей / Редактор: А. А. Земцов; Томский государственный университет. Том Выпуск 10. –Томск: Томский государственный университет, 1978. С. 95-105.

3. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. Том I. Изменчивость факторов среды обитания - СПб.: РГГМУ, 2009. с.24.

4. Кондратьев, С. А. Структура поверхности водосбора как определяющий фактор биогенной нагрузки на водоём (по данным математического моделирования) / С. А. Кондратьев, А. Ю. Брюханов, А. В. Терехов // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 89-108.

5. Кондратьев, С. А. Детерминировано-стохастическое моделирование стока и биогенной нагрузки на водные объекты (на примере Финского залива Балтийского моря) / С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова, В. И. Уличев. Санкт-Петербург : Лема, 2013. 36 с.

6. Фрумин Г.Т., Хуан Ж.-Ж. Вероятностная оценка трофического статуса водных объектов. Методическое пособие. СПб.: РГГМУ. 2012. 28 с.

7. Хрисанов Н. И. Управление эвтрофированием водоемов / Н. И. Хрисанов, Г. К. Осипов. - СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 276 с.

8. Frumin G. T. Total phosphorus distribution over the Baltic Sea sub-regions // Russian Journal of General Chemistry. 2013. Volume 8. P. 2647-2650.

UDC 504.4.054

Sow Amadou Djoulde

sowamadoudjould@mail.ru

Herzen University, Saint Petersburg, Russia

Dependence of the amount of phosphorus entering the Gulf of Finland and the reaction of the reservoir

Abstract: *This article addresses the issue of pollution in the Baltic Sea caused by biogenic substances from the watershed of the Novaya River. The objective of the research is to assess the diffuse biogenic load originating from the Novaya River watershed. The first section provides a theoretical foundation for the phenomenon of eutrophication, followed by a discussion of the situation and characteristics of the Novaya River. In the conclusion, the utilized mathematical model is examined, demonstrating that the maximum allowable export of phosphorus and nitrogen to the Gulf of Finland significantly exceeds the overall load on the Novaya River from its watershed.*

Keywords: *eutrophication, biogenic load, water body, Novaya River.*