

Е.В. Степанова, Г.Т. Фрумин

ФОНОВЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ФОСФОРА В НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ И ЧАСТИЧНО КОНТРОЛИРУЕМЫХ РЕКАХ БАСЕЙНА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

E.V. Stepanova, G.T. Frumin

BACKGROUND PHOSPHORUS CONCENTRATIONS IN THE UNMONITORED AND PARTIALLY MONITORED RIVERS OF THE BALTIC SEA BASIN

Выполнена оценка модулей фонового стока валового (нефильтрованного) фосфора с водосборных территорий ряда неконтролируемых и частично контролируемых рек бассейна Балтийского моря и фоновых концентраций валового фосфора в водах рассматриваемых рек.

Ключевые слова: эвтрофирование, биогенные элементы, фоновые концентрации, модули стока.

The unit area background discharges of the total (unfiltrated) phosphorus from the catchment areas of some unmonitored and partially monitored rivers of the Baltic Sea basin and background concentrations of total phosphorus in waters of the considered rivers are estimated.

Key words: eutrophication, nutrients, background concentrations, unit area discharges.

Современное развитие Балтийского моря как элемента географической среды определяется принадлежностью его бассейна к числу наиболее густонаселенных и высокоразвитых районов мира с высокой концентрацией промышленности и интенсивным сельским и лесным хозяйством. Усиливается эксплуатация Балтики как источника биологических ресурсов, приемника сточных вод, транспортной артерии, рекреационной зоны, источника полезных ископаемых.

Центральной проблемой Балтийского моря в настоящее время стало антропогенное эвтрофирование [2]; основные признаки эвтрофирования в Балтийском море были выявлены раньше, чем на других морских акваториях. Быстрому эвтрофированию Балтийского моря способствует ряд причин, из которых важнейшими являются следующие две. Во-первых, это сравнительно небольшое море, окруженное экономически высокоразвитыми странами; водосбор Балтийского моря занимает 1 720 270 км² и почти в 4 раза превышает площадь самого моря [18]. Годовой объем речного стока составляет свыше 2 % объема всего моря [3]. Несмотря на принимаемые водоохранные меры, в Балтийское море поступает значительное количество органических загрязнений и биогенных элементов. Вторая причина, содействующая эвтрофированию Балтийского моря, заключается в полузамкнутости этого водоема. Замедленный водообмен с Северным морем приводит к тому, что органические вещества как аллохтонные, так и автохтонные и питательные соли накапливаются в преобладающем большинстве в самом море.

Одним из важнейших факторов развития этого процесса является биогенная нагрузка с водосборного бассейна моря, которая имеет две составляющие: природную и антропогенную. Чрезвычайно важно в балансе биогенных соединений в море, в миграционных потоках вещества дифференцировать и оценить роль антропогенной составляющей. Основным поставщиком биогенных веществ природного и антропогенного происхождения в Балтийское море является речной сток, что, в общем, является характерным для увлажненной гумидной зоны, в связи с чем очевидна необходимость не только количественной оценки источников эвтрофирующих веществ на территории бассейна, но и дифференцированной фоновой (природной) и антропогенной составляющих биогенного стока рек в замыкающих створах. Особое внимание следует обратить на то, что, как правило, фоновый биогенный сток соизмерим с антропогенным, а в ряде случаев превышает его. Это обстоятельство предполагает необходимость учета фонового стока при квотировании биогенной нагрузки на приемные водоемы. Однако проблема определения соотношения между величинами природного и антропогенного биогенного стока весьма сложна и до сих пор остается дискуссионной.

Ранее нами были предложены и опробованы методики оценки фоновой составляющей биогенного стока с контролируруемыми реками бассейна Балтийского моря, для которых имеются ряды данных гидрохимических и гидрологических наблюдений [9, 10, 11, 12, 13]. Однако для оценки фоновых концентраций биогенных элементов в неконтролируемых или частично контролируемых реках необходима разработка специальных методик. В связи с изложенным, цель данной работы заключалась в оценке фоновых концентраций валового (нефильтрованного) фосфора в водах неконтролируемых и частично контролируемых рек бассейна Балтийского моря.

На первом этапе была проведена оценка модулей фонового стока валового фосфора с водосборных территорий ряда рек бассейна Балтийского моря. Модуль стока является универсальной характеристикой, которая, независимо от порядка и водности реки, выступает в качестве меры интенсивности антропогенного воздействия на территории водосбора.

В основу разработанной нами методики было положено представление о том, что природная составляющая фосфорной нагрузки на водоем с его водосборного бассейна зависит от первичной продукции наземных экосистем, контролируемой факторами внешней среды: температурой, количеством осадков и испарением [4, 7, 20, 21]. Факторы внешней среды, воздействующие на продукционные процессы в водоемах и на суше, тесно связаны с географической зональностью, которую можно рассматривать как фактор, интегрирующий влияние эдафических и климатических условий на продуктивность водных экосистем [1]. На основании работ [1, 7] нами была предложена эмпирическая зависимость между модулем фонового стока валового фосфора с водосборной территории ($M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}$, кг·Р·км⁻²·год⁻¹) и географической широтой местности (φ , ° с.ш.) для интервала широт от 10° с.ш. до 70° с.ш. [10, 11, 16]:

$$M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}} = 221 - 52,3 \cdot \ln \varphi. \quad (1)$$

Обоснованием правомерности такого подхода послужили результаты сравнения величин фонового стока валового фосфора с р. Невой и ее рукавами и модулей фонового стока валового фосфора с водосбора р. Невы, оцененных нами с использованием различных подходов:

- 1) метода эмпирических фоновых коэффициентов, предложенного М.П. Максимовой [8] и модифицированного нами для р. Невы и ее рукавов [10, 12, 13, 14];
- 2) методики, разработанной нами [10, 13, 15, 16] на основании зависимости концентрации загрязняющих веществ, находящихся в растворенном состоянии от величин обратных расходов реки, предложенной Д. Дейвисом и Д. Цобристом [17];
- 3) описанной выше методики, основанной на применении зависимости (1) [11, 16].

Результаты наших расчетов также были сопоставлены с величинами, полученными С.А. Кондратьевым методом математического моделирования [5].

Нами было показано, что для расчетов величин фонового стока валового фосфора с водосборных территорий рек с небольшими водосборами в первом приближении могут быть использованы значения географической широты в средней точке водосбора ($\varphi_{\text{ср}}$, ° с.ш.). Расчет фонового поступления $Q_{\text{вал}}$ с водосбора реки, занимающего по широте 2° с.ш. (со средним значением географической широты 59° с.ш.), что составляет около 222 км, приводит в таком случае к относительной погрешности немногим более 1 % [10]. Методика расчета величин фонового стока валового фосфора с водосборных территорий рек с большими водосборами подробно изложена в [9].

На втором этапе нами были определены величины фоновых составляющих стока фосфора с территорий водосборов рассматриваемых нами рек ($Q_{\text{вал}}^{\text{ФОН}}$, т·год⁻¹) без учета удержания биогенных элементов водосборами и их гидрографической сетью:

$$Q_{\text{вал}}^{\text{ФОН}} = \frac{M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}}{1000} \cdot S, \quad (2)$$

где S – площадь водосбора, км².

На основании полученных результатов были рассчитаны среднегодовые фоновые концентрации фосфора ($C_{\text{СГ}}(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}$, мкг·дм⁻³) с учетом удержания водосборами и их гидрографической сетью:

$$C_{\text{СГ}}(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}} = \frac{R_f(P_{\text{вал}}) \cdot Q_{\text{вал}}^{\text{ФОН}}}{0,0315 \cdot R_{\text{СГ}}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{СГ}}$ – среднегодовой расход воды, м³·с⁻¹; R_f – коэффициенты выноса фосфора, рассчитанные согласно [6].

Результаты расчетов приведены в таблице.

**Модули фонового стока и фоновые концентрации валового фосфора
для некоторых рек бассейна Балтийского моря**

| Река | S , км ² | $R_{СГ}$, м ³ ·с ⁻¹ | $M(P_{вал})_{ФОН}$, кгР·км ⁻² ·год ⁻¹ | $Q(P_{вал})_{ФОН}$, т·год ⁻¹ | R_i | $C_{СГ}(P_{вал})_{ФОН}$, мкг·дм ⁻³ |
|--|--------------------------|---|---|---|-------|---|
| Реки, впадающие в Финский залив | | | | | | |
| Валиман-йоки (Кокселан-йоки) | 295 | 3,1 | 6,43 | 1,90 | 0,69 | 14 |
| Серьга (Урпала-йоки) | 94,5 | 1,02 | 6,39 | 0,60 | 0,70 | 13 |
| Песчанка (Санта-йоки, Еолка-йоки) | 200 | 2,1 | 6,37 | 1,27 | 0,69 | 13 |
| Вила-йоки (Великая) | 161 | 1,7 | 6,33 | 1,02 | 0,70 | 13 |
| Чулковка (Киси-йоки, Ниса-йоки) | 72 | 0,78 | 6,29 | 0,45 | 0,71 | 13 |
| Полевая (Терва-йоки) | 160 | 1,74 | 6,28 | 1,00 | 0,71 | 13 |
| Селезневка (Юкспян-йоки) | 623 | 6,7 | 5,69 | 3,55 | 0,70 | 12 |
| Черкасовка (Иля-йоки) | 116 | 1,25 | 6,07 | 0,70 | 0,70 | 13 |
| Дрема (Корпелан-йоки) | 45,7 | 0,5 | 6,35 | 0,29 | 0,71 | 13 |
| Матросовка (Соммен-йоки) | 55,2 | 0,6 | 6,36 | 0,35 | 0,71 | 13 |
| Гороховка (Александровка, Рохколан-йоки) | 731 | 7,9 | 6,43 | 4,70 | 0,71 | 13 |
| протока Виха-йоки | 42,5 | 0,46 | 6,60 | 0,28 | 0,71 | 14 |
| руч. Лососинка | 56,2 | 0,6 | 6,67 | 0,37 | 0,70 | 14 |
| Приветная (Инон-йоки, Озерная, Местерярвен-йоки) | 70 | 0,8 | 6,72 | 0,47 | 0,73 | 14 |
| Черная (Гладышевка, Ваммелсун-йоки) | 668 | 7,2 | 6,65 | 4,44 | 0,70 | 14 |
| Сестра | 399 | 4,3 | 6,67 | 2,66 | 0,70 | 14 |
| Черная | 126 | 1,4 | 6,74 | 0,85 | 0,72 | 14 |
| Каменка | 134 | 1,5 | 6,85 | 0,92 | 0,72 | 14 |
| Дудергофка | 120 | 0,69 | 7,07 | 0,85 | 0,41 | 16 |
| Кикенка (Кекенка) | 68 | 0,29 | 7,00 | 0,48 | 0,28 | 15 |
| Стрелка | 155 | 2,45 | 7,15 | 1,11 | 0,83 | 12 |
| Шингарка | 121 | 1,3 | 7,08 | 0,86 | 0,70 | 15 |
| Караста | 55,8 | 0,62 | 6,96 | 0,39 | 0,72 | 14 |
| Черная Речка (Сапа-оя) | 96,2 | 0,7 | 7,25 | 0,70 | 0,53 | 17 |
| Лебязья | 101 | 0,74 | 6,93 | 0,70 | 0,53 | 16 |
| Коваши | 612 | 4,45 | 7,03 | 4,30 | 0,53 | 16 |

| Река | S , км ² | R_{CF} , м ³ ·с ⁻¹ | $M(P_{вал})^{ФОН}$, кгР·км ⁻² ·год ⁻¹ | $Q(P_{вал})^{ФОН}$, т·год ⁻¹ | R_t | $C_{CF}(P_{вал})^{ФОН}$, МКГ·ДМ ⁻³ |
|---|--------------------------|---|---|---|-------|---|
| Воронка | 286 | 2,08 | 7,07 | 2,02 | 0,53 | 16 |
| Систа (Теплушка) | 672 | 7,2 | 7,15 | 4,81 | 0,70 | 15 |
| руч. Ловколовский | 50 | 0,36 | 7,06 | 0,35 | 0,52 | 16 |
| Хаболовка (Хобаловка) | 330 | 3,53 | 7,17 | 2,37 | 0,70 | 15 |
| Лужица | 50 | 0,36 | 7,20 | 0,36 | 0,52 | 17 |
| Реки, впадающие в Куршский залив | | | | | | |
| Дальняя (Акминге) | 38,5 | 0,29 | 11,21 | 0,43 | 0,54 | 26 |
| Разлив (Каркельнфлюс) | 64,8 | 0,49 | 11,25 | 0,73 | 0,55 | 26 |
| Узкая (Рунгел) | 23,3 | 0,18 | 11,26 | 0,26 | 0,56 | 26 |
| Рыбная (Лойефлюс) | 68 | 0,52 | 11,29 | 0,77 | 0,55 | 26 |
| Промысловая-Прудный канал (Грибе-Клейн Прудимм) | 70,7 | 0,54 | 11,25 | 0,80 | 0,55 | 26 |
| Немонин (Немонина, Шалтайк) | 1380 | 9,5 | 11,44 | 15,8 | 0,50 | 26 |
| Дейма (Дайме) | 100 | 0,76 | 11,65 | 1,17 | 0,55 | 27 |
| Восточный канал-Овражка | 59,4 | 0,45 | 11,57 | 0,69 | 0,55 | 27 |
| Западный канал--Славная | 170 | 1,29 | 11,63 | 1,98 | 0,55 | 27 |
| Ольховка | 43,7 | 0,33 | 11,48 | 0,50 | 0,55 | 26 |
| Малая Морянка | 36,6 | 0,28 | 11,49 | 0,42 | 0,55 | 26 |
| Большая Морянка | 65,1 | 0,49 | 11,48 | 0,75 | 0,54 | 26 |
| Калиновка | 15,4 | 0,12 | 11,53 | 0,18 | 0,56 | 26 |
| Лобовка | 37 | 0,28 | 11,51 | 0,43 | 0,55 | 26 |
| Куровка (Даринер Беек) | 60,6 | 0,46 | 11,52 | 0,70 | 0,55 | 26 |
| Тростянка (Бледауэр Беек) | 123 | 0,93 | 11,83 | 1,45 | 0,55 | 27 |
| Реки, впадающие в Вислинский залив | | | | | | |
| Граевка (Лаукне-Грейбауэр Мюенфлюс) | 137 | 1,04 | 11,65 | 1,60 | 0,55 | 27 |
| Калининградский (Кенигсбергский) обводной канал | 59 | 0,45 | 11,55 | 0,68 | 0,55 | 26 |
| Нельма (Форкнерфлюс) | 167 | 1,27 | 11,61 | 1,94 | 0,55 | 27 |
| Приморская (Гермауер Мюленфлюс) | 126 | 0,96 | 11,63 | 1,46 | 0,55 | 27 |
| Проходная (Фришинг) | 1170 | 8,9 | 11,84 | 13,9 | 0,55 | 27 |
| Мамоновка (Бенау) | 311 | 2,6 | 11,94 | 3,71 | 0,59 | 27 |

Полученные нами расчетные значения модулей фонового стока и фоновых концентраций фосфора согласуются с официальными данными по поступлению в Балтийское море биогенных элементов с водосборных территорий стран-участников ХЕЛКОМ (Хельсинкской Комиссии по защите морской среды Балтийского моря) [18, 19].

Таким образом, предложенный нами подход позволяет а priori выполнить оценку фоновых концентраций фосфора в реках без необходимости проведения трудоемкой процедуры сбора и обработки больших массивов данных, характеризующих их водосборные территории.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ по гранту 14.В37.21.0651 «Разработка методов квотирования биогенных нагрузок и снижения рисков химического и биологического загрязнения трансграничных водных объектов на основе комплексного анализа данных гидрометеорологического мониторинга».

Литература

1. Бульон В.В. Эвтрофирование и деэвтрофирование озер как реакция на изменение фосфорной нагрузки с водосборной площади. // Теория и практика восстановления внутренних водоемов. Под ред. Румянцев В.А., Кондратьева С.А. — СПб.: Лема, 2007, с. 44–54.
2. Германова А.В., Фрумин Г.Т. Поступление биогенных элементов в Балтийское море со стоком трансграничных рек. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 24, с. 100–106.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III. Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Под ред. Терзиева Ф. С. и др. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. — 450 с.
4. Исаченко А.Г. Основные вопросы физической географии. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1953. — 391 с.
5. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. — СПб.: Наука, 2007. — 253 с.
6. Кондратьев С.А., Мельник М.М., Шмакова М.В., Маркова Е.Г., Ульянова Т.Ю. Метод расчета внешней нагрузки на Чудско-Псковское озеро с Российской территории водосбора. // Общество. Среда. Развитие (Тerra Humanum), 2010, № 1, с. 183–197.
7. Лит Х. Моделирование первичной продуктивности Земного шара. // Экология, 1974, № 2, с. 13–23.
8. Максимова М.П. Критерии антропогенного эвтрофирования речного стока и расчет антропогенной составляющей биогенного стока рек. // Водные ресурсы, 1979, № 1, с. 35–40.
9. Степанова Е.В. Оценка фоновой составляющей стока валового фосфора с водами контролируемых и неконтролируемых рек бассейна Балтийского моря. // Молодой ученый, 2009, № 11, с. 352–355.
10. Степанова Е.В. Геоэкологическое обоснование предельных уровней экспорта биогенных элементов с территорий стран бассейна Балтийского моря. Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. — СПб, 2009. — 24 с.
11. Степанова Е.В., Фрумин Г.Т. Методы оценки выноса фоновой биогенной нагрузки с водами рек бассейна Балтийского моря. // Устойчивое развитие и геоэкологические проблемы Балтийского региона: материалы Международной научно-практической конференции. НовГУ им. Ярослава Мудрого, 23–25 октября 2009 г. — Великий Новгород, 2009, с. 357–361.
12. Фрумин Г.Т., Степанова Е.В. Природная и антропогенная составляющие биогенного стока реки Невы в Невскую губу. // Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография. / Под ред. Нестерова Е.М. — СПб.: Эпиграф, 2008, с. 142–145.
13. Фрумин Г.Т., Степанова Е.В. План действий по Балтийскому морю. Раздел эвтрофирование. // Экологическая химия, 2009, т. 18, вып. 1, с. 1–9.
14. Фрумин Г.Т., Степанова Е.В. Фоновые концентрации биогенных элементов в реках бассейна Балтийского моря. // Сборник материалов X Международного экологического форума «День Балтийского моря». — СПб.: ООО «Макси-Принт», 2009, с. 69–71.

15. Фрумин Г.Т., Степанова Е.В. Фоновые концентрации биогенных элементов в реках бассейна Балтийского моря. // Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон, ЭКОГИДРОМЕТ. Материалы V международной конференции. Санкт-Петербург, 7–9 июля 2009 г. – СПб.: Кримас+, 2009, с. 136–137.
16. Фрумин Г.Т., Степанова Е.В. Оценка выноса фоновой биогенной нагрузки с водами контролируемых и неконтролируемых рек бассейна Балтийского моря. // «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон»: Материалы международной конференции. ЭКОГИДРОМЕТ (7–9 июля 2009 г.). Сборник трудов. – СПб.: ВВМ, 2010, с. 97–102.
17. Davis J.S., Zobrist J. The interrelationships among chemical parameters in rivers – Analyzing the effect of natural and anthropogenic sources. // Progress in water technology, 1978, vol. 10, p. 65–78.
18. HELCOM, 2004. The fourth Baltic Sea pollution load compilation (PLC-4). // Balt. Sea Environ. Proc. No. 93. – 189 p.
19. HELCOM, 2011. The fifth Baltic Sea pollution load compilation (PLC-5). // Balt. Sea Environ. Proc. No. 128. – 220 p.
20. Rosenzweig M.L. Net primary production of terrestrial communities, prediction from climatological data. // Amer. Nat, 1968, vol. 102, p. 67–74.
21. Schuur A.G. Productivity and global climate revisited: the sensitivity of tropical forest growth to precipitation. // Ecology, 2003, vol. 84, No. 5, p. 1165–1170.