

А.В. Германова, Г.Т. Фрумин

ПОСТУПЛЕНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ СО СТОКОМ ТРАНСГРАНИЧНЫХ РЕК

A.V. Germanova, G.T. Frumin

INPUT OF NUTRIENTS TO THE BALTIC SEA FROM INTERNATIONAL RIVERS

Цель данного исследования заключалась в отыскании наиболее информативных дескрипторов для количественного описания связи между поступлением фосфора общего и азота общего в Балтийское море со стоком четырнадцати трансграничных рек (Q т) и характеристиками их водосборных бассейнов. Для достижения этой цели были использованы первичные данные, приведенные в работе S. Nilsson «International river basins in the Baltic Sea Region». Расчеты показали, что наиболее информативным дескриптором является количество населения на водосборном бассейне рек.

Ключевые слова: фосфор общий, азот общий, Балтийское море, водосборный бассейн.

The aim of this research is an attempt to find relationships between input of total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) to the Baltic Sea from 14 larger international rivers and some characteristics of the rivers basins (area of basin, total number of inhabitants, population density, the areas of forests, shrubs, cultivated areas, areas of water bodies and total river runoff to the sea in year 2000). Calculations have shown that the most informative characteristic is the population on a river basin.

Key words: total phosphorus, total nitrogen, Baltic Sea, river basin.

В марте 1974 г. представителями стран Балтики – ГДР, Дании, Польши, СССР, Финляндии, ФРГ и Швеции – была подписана конвенция по охране морской среды Балтийского моря (Хельсинкская конвенция), вступившая в силу в мае 1980 г. Эта конвенция, принятая в целях охраны морской среды Балтийского моря, стала первым международным соглашением, затрагивающим все источники загрязнения, расположенные на побережье (точечные и диффузные), в море (морские суда), а также атмосферу. Однако и сегодня, по прошествии более тридцати лет, основные экологические проблемы Балтики остаются весьма актуальными.

15 ноября 2007 г. в Кракове (Польша) министрами охраны окружающей среды стран Балтийского моря был согласован план действий для Балтийского моря (ПДБМ), который является долгосрочным стратегическим документом, направленным на сокращение загрязнения морской среды, достигшего в последнее время угрожающего размера, и восстановления благополучного экологического состояния Балтики к 2021 г. В ПДБМ включены четыре основных раздела («эвтрофирование», «вредные вещества», «биоразнообразие и охрана природы» и «морская деятельность»).

Основные экологические проблемы Балтийского моря в современный период обусловлены процессами эвтрофирования, химического загрязнения, аварийными

ситуациями, сопровождающимися разливами нефти и нефтепродуктов, химическими боеприпасами и биоразнообразием [1, 3-6].

Главная проблема в Балтийском море - эвтрофирование. Развитие процесса антропогенного эвтрофирования приводит ко многим неблагоприятным последствиям с точки зрения водопользования и водопотребления (развитие «цветения» и ухудшения качества воды, появление анаэробных зон, нарушение структуры биоценозов и исчезновение многих видов гидробионтов, в том числе ценных промысловых рыб). Кроме того, в период цветения сине-зеленые водоросли производят сильнейшие токсины (алкалоиды, низкомолекулярные пептиды и др.), которые сами не используют, но они, попадая в водную толщу, представляют опасность для живых организмов и человека. Эти токсины могут вызывать цирроз печени, дерматиты у людей, отравление и гибель животных.

Половина фосфорной нагрузки поступает в Балтийское море со стоком рек. Большая часть дополнительного к природному фосфору поступает в результате деятельности лесного и сельского хозяйства, в результате неправильного использования удобрений. Есть и другие, так называемые, точечные источники нагрузок – предприятия по переработке леса и, конечно, сбросы населенных пунктов, особенно крупных городов (канализационные стоки, ливневая канализация, моющие средства).

Чрезмерное поступление азота и фосфора от наземных источников является основной причиной эвтрофирования Балтийского моря. Приблизительно 75 % азота и, по крайней мере, 95 % фосфора попадают в Балтийское море через реки или через прямые сбросы. Около 25 % азота поступает из атмосферы.

Объемы фосфора, поступающие в настоящее время в Балтийское море, в восемь раз, а азота в четыре раза превышают объемы, которые поступали в начале XX века. Особенно эти объемы стали увеличиваться после второй мировой войны, достигнув своего пика в 1960-е и 1970-е годы. Рост нагрузки по азоту некоторых балтийских государств замедлился, а сбросы фосфора в течение последнего десятилетия даже сократились. Уменьшение фосфорной нагрузки замедлило эвтрофирование, но только в Ботническом заливе, где фосфор является важнейшим лимитирующим рост растений питательным элементом.

Цель данного исследования заключалась в отыскании наиболее информативных дескрипторов для количественного описания связи между поступлением фосфора общего (Q_P) и азота общего (Q_N) в Балтийское море со стоком четырнадцати трансграничных рек (табл. 1) и характеристиками их водосборных бассейнов. Для достижения этой цели были использованы первичные данные, приведенные в работе S.Nilsson «International river basins in the Baltic Sea Region». Все данные относятся к 2000 г.

Таблица 1

Распределение водосборных бассейнов рек по странам

| Река | Доля водосборного бассейна, % |
|---------|--|
| Нева | Россия 80 %, Финляндия 20 % |
| Висла | Польша 87 %, Украина 7 %, Белоруссия 5 %, Словакия 1 % |
| Одер | Польша 90 %, Чехия 65 %, Германия 4 % |
| Даугава | Белоруссия 38 %, Россия 32 %, Латвия 28 %, Литва 2 % |

| Река | Доля водосборного бассейна, % |
|---------------|---|
| Неман | Белоруссия 48 %, Литва 47 %, Польша 3 %, Россия 2 % |
| Нарва | Россия 63 %, Эстония 31 %, Латвия 6 % |
| Кемийоки | Финляндия 97 %, Россия 3 % |
| Гета-Эльв | Швеция 84 %, Норвегия 16 % |
| Турне-Эльв | Швеция 64 %, Финляндия 35 %, Норвегия 1 % |
| Индальсельвен | Швеция 92 %, Норвегия 8 % |
| Преголя | Польша 52 %, Россия 48 % |
| Гауя | Латвия 87 %, Эстония 13 % |
| Лиелупе | Латвия 50 %, Литва 50 % |
| Вента | Латвия 55 %, Литва 45 % |

В качестве дескрипторов были рассмотрены количество населения на водосборе (x_1 , человек), площадь водосборного бассейна (x_2 , км²), расход воды (x_3 , м³/год·10⁶), плотность населения на водосборе (x_4 , чел./км²), площадь леса на водосборе (x_5 , км²), площадь пахотных угодий на водосборе (x_6 , км²) и площадь кустарников или травянистого покрова (x_7 , км²). Кроме того, в качестве дескриптора была использована площадь водных объектов на водосборных бассейнах рассмотренных рек (x_8 , км²). Первичные данные для анализов представлены в таблицах 2 и 3. Информативность моделей оценивали величиной коэффициента детерминации (r^2).

Таблица 2

Поступление фосфора общего в Балтийское море со стоком трансграничных рек и характеристики их водосборных бассейнов

| Река | Q_p , т | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 |
|---------------|-----------|------------|---------|--------|-------|---------|---------|--------|
| Нева | 2 400 | 6 107 900 | 286 553 | 66 500 | 21,3 | 209 184 | 4 871 | 11 462 |
| Висла | 7 500 | 23 487 300 | 193 347 | 42 400 | 121,5 | 50 270 | 106 341 | 23 202 |
| Одер | 3 700 | 16 167 200 | 117 862 | 16 200 | 137,2 | 31 823 | 67 181 | 10 254 |
| Даугава | 1 400 | 2 783 200 | 86 052 | 20 700 | 32,3 | 44 747 | 17 210 | 7 917 |
| Неман | 1 800 | 4 890 900 | 92 318 | 20 000 | 53,0 | 27 695 | 45 236 | 7 108 |
| Нарва | 530 | 936 100 | 56 797 | 10 700 | 16,5 | 28 966 | 13 631 | 3 067 |
| Кемийоки | 460 | 108 100 | 51 036 | 23 300 | 2,1 | 39 808 | 102 | 8 166 |
| Гета-Эльв | 420 | 1 003 300 | 48 326 | 23 100 | 20,8 | 30 445 | 4 156 | 2 368 |
| Турне-Эльв | 490 | 79 700 | 39 705 | 17 800 | 2,0 | 23 029 | 199 | 13 103 |
| Индальсельвен | 240 | 109 200 | 25 518 | 19 100 | 4,3 | 18 118 | 255 | 4 083 |
| Преголя | 570 | 1 283 600 | 14 783 | 2 700 | 86,8 | 2 365 | 10 348 | 917 |
| Гауя | 95 | 155 300 | 8 652 | 2 100 | 17,9 | 4 239 | 2 596 | 1 038 |
| Лиелупе | 230 | 668 200 | 17 876 | 2 400 | 37,4 | 3 575 | 11 441 | 1 448 |
| Вента | 95 | 347 600 | 11 624 | 2 200 | 29,9 | 3 138 | 6 509 | 1 035 |

Таблица 3

**Поступление азота общего в Балтийское море со стоком трансграничных рек
и характеристики их водосборных бассейнов**

| Река | $Q_N, \text{ т}$ | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 |
|---------------|------------------|------------|---------|--------|-------|---------|---------|--------|
| Нева | 52 500 | 6 107 900 | 286 553 | 66 500 | 21,3 | 209 184 | 4 871 | 11 462 |
| Висла | 124 000 | 23 487 300 | 193 347 | 42 400 | 121,5 | 50 270 | 106 341 | 23 202 |
| Одер | 55 200 | 16 167 200 | 117 862 | 16 200 | 137,2 | 31 823 | 67 181 | 10 254 |
| Даугава | 40 600 | 2 783 200 | 86 052 | 20 700 | 32,3 | 44 747 | 17 210 | 7 917 |
| Неман | 46 800 | 4 890 900 | 92 318 | 20 000 | 53,0 | 27 695 | 45 236 | 7 108 |
| Нарва | 6 500 | 936 100 | 56 797 | 10 700 | 16,5 | 28 966 | 13 631 | 3 067 |
| Кемийоки | 8 500 | 108 100 | 51 036 | 23 300 | 2,1 | 39 808 | 102 | 8 166 |
| Гета-Эльв | 20 300 | 1 003 300 | 48 326 | 23 100 | 20,8 | 30 445 | 4 156 | 2 368 |
| Турне-Эльв | 8 100 | 79 700 | 39 705 | 17 800 | 2,0 | 23 029 | 199 | 13 103 |
| Индальсельвен | 6 700 | 109 200 | 25 518 | 19 100 | 4,3 | 18 118 | 255 | 4 083 |
| Преголя | 9 500 | 1 283 600 | 14 783 | 2 700 | 86,8 | 2 365 | 10 348 | 917 |
| Гауя | 3 000 | 155 300 | 8 652 | 2 100 | 17,9 | 4 239 | 2 596 | 1 038 |
| Лиелупе | 10 700 | 668 200 | 17 876 | 2 400 | 37,4 | 3 575 | 11 441 | 1 448 |
| Вента | 5 200 | 347 600 | 11 624 | 2 200 | 29,9 | 3 138 | 6 509 | 1 035 |

При построении однопараметрических линейных моделей для фосфора общего было выявлено, что коэффициенты детерминации ранжируются следующим образом:

$$x_1 (r^2 = 0,96) > x_6 (r^2 = 0,87) > x_7 (r^2 = 0,73) > x_4 (r^2 = 0,57) > \\ > x_2 (r^2 = 0,50) > x_3 (r^2 = 0,31) > x_5 (r^2 = 0,1) > x_8 (r^2 = 0,01).$$

Таким образом, наиболее информативным показателем при построении количественной модели, описывающей зависимость поступления фосфора общего со стоком трансграничных рек в Балтийское море, является количество населения на территории водосборного бассейна. Эта модель имеет следующий вид (см. также рис. 1):

$$Q_p = 248 + 0,000283 \cdot x_1; \\ N = 14; r = 0,979; r^2 = 0,959; \sigma_{Y(X)} = 429; F_p = 280,6; F_T = 4,67. \quad (1)$$

Здесь N – количество рек; r – коэффициент корреляции (теснота связи между переменными); r^2 – коэффициент детерминации (объяснимая доля разброса); $\sigma_{Y(X)}$ – стандартная ошибка; F_p – расчетное значение критерия Фишера; F_T – табличное значение критерия Фишера для уровня значимости 95 %.

Приведенные статистические характеристики показывают, что модель (1) адекватна ($F_p > F_T$) и более того, может быть использована для ориентировочного прогнозирования ($F_p > 4 F_T$) поступления в Балтийское море фосфора общего со стоком тех рек, данные для которых не были использованы при построении модели и для которых такие данные имеются [2].

При $x_1 = 0$ (отсутствие населения на водосборном бассейне) величина $Q_p = 248$ т. Это значение характеризует усредненную природную составляющую стока фосфора общего в Балтийское море для всего рассмотренного водосборного бассейна площадью 1 050 449 км².

Помимо количества населения на водосборном бассейне (x_1), другими достаточно информативными дескрипторами являются площадь пахотных угодий на водосборе (x_6) и площадь кустарников или травянистого покрова (x_7). Коэффициент детерминации равен: между x_1 и x_6 0,91; между x_1 и x_7 0,62 и между x_6 и x_7 0,49.

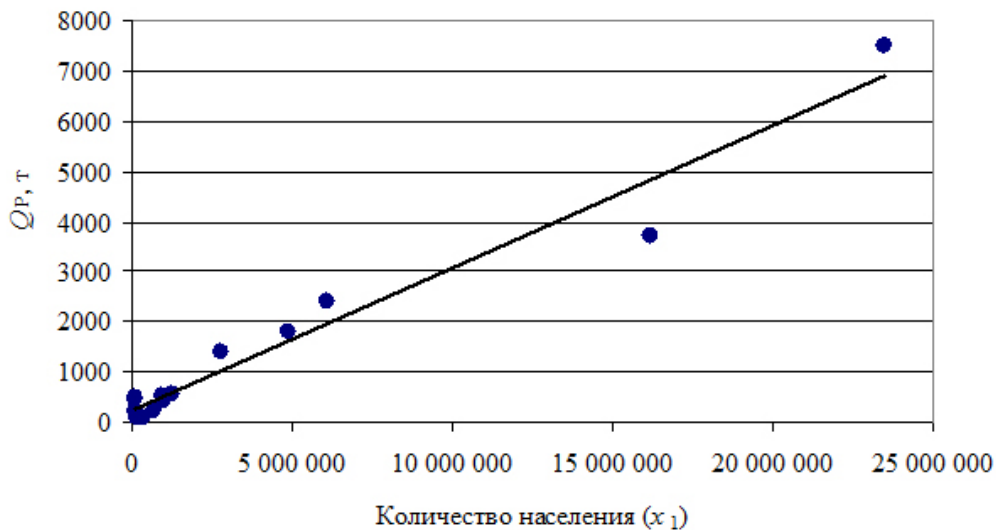


Рис. 1. Зависимость поступления фосфора общего со стоком трансграничных рек в Балтийское море от количества населения на водосборах рек

Согласно ПДБМ, максимально допустимое поступление фосфора общего в Балтийское море составляет 21 060 т/год. С другой стороны, как следует из выше-приведенной табл. 2, со стоком 14 трансграничных рек в 2000 г. в Балтику поступило 19 930 т фосфора общего, что составляет 94,6 % от максимально допустимого поступления от различных источников.

При анализе данных, приведенных в табл. 3, была выявлена следующая статистически значимая зависимость между поступлением в Балтийское море азота общего со стоком трансграничных рек и количеством населения на их водосборных бассейнах (см. также рис. 2):

$$Q_N = 9940 + 0,004446 \cdot x_1; \quad (2)$$

$$N = 14; r = 0,934; r^2 = 0,873; \sigma_{Y(X)} = 12\,440; F_p = 82,37; F_T = 4,67.$$

Приведенные статистические характеристики показывают, что модель (2) адекватна ($F_p > F_T$) и, более того, может быть использована для ориентировочного прогно-

зирования ($F_p > 4 F_T$) поступления в Балтийское море азота общего со стоком тех рек, данные для которых не были использованы при построении модели и для которых такие данные имеются.

При $x_1 = 0$ (отсутствие населения на водосборном бассейне) величина $Q_N = 9\ 940$ т. Это значение характеризует усредненную природную составляющую стока азота общего в Балтийское море для всего рассмотренного водосборного бассейна площадью 1 050 449 км².

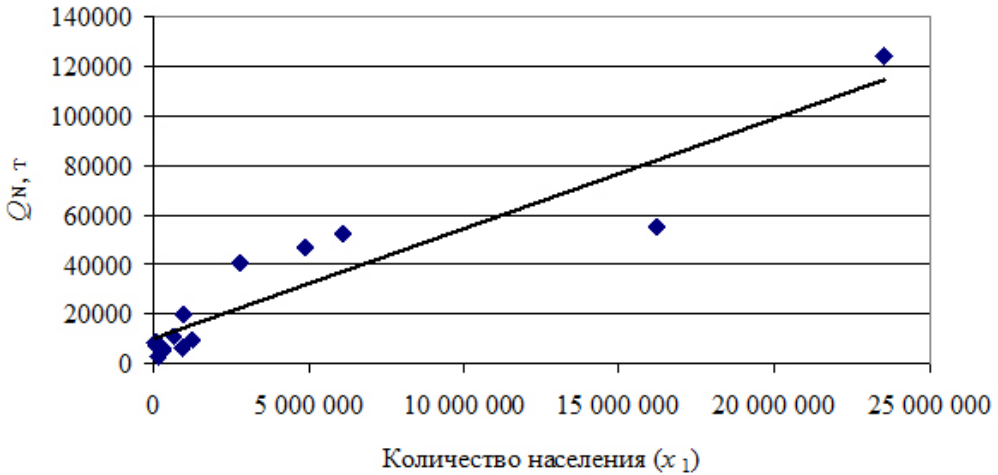


Рис. 2. Зависимость поступления азота общего со стоком трансграничных рек в Балтийское море от количества населения на водосборах рек

Кроме количества населения на водосборном бассейне (x_1), другими достаточно информативными дескрипторами являются площадь пахотных угодий на водосборе (x_6), площадь кустарников или травянистого покрова (x_7) и площадь водосборного бассейна (x_2).

Согласно ПДБМ, максимально допустимое поступление азота общего в Балтийское море составляет 601 720 т/год. С другой стороны, как следует из вышеприведенных данных, со стоком 14 трансграничных рек в 2000 г. в Балтику поступило 397 600 т азота общего, что составляет 66,1 % от максимально допустимого поступления от различных источников.

В дополнение к изложенному была выявлена статистически значимая зависимость между поступлением в Балтийское море азота общего и фосфора общего со стоком трансграничных рек (см. также рис. 3):

$$Q_N = 5539 + 16,6 \cdot Q_P; \tag{3}$$

$$N = 14; r = 0,976; r^2 = 0,952; \sigma_{Y(X)} = 7\ 672; F_p = 236,12; F_T = 4,67.$$

Зависимость (3) может быть полезной для ориентировочного прогнозирования поступления азота общего или фосфора общего в Балтийское море со стоком тех рек,

данные для которых не были включены в модель. Для этого достаточно рассчитать поступление в море одного из рассматриваемых биогенных элементов и по уравнению (3) провести расчет поступления другого биогенного элемента.

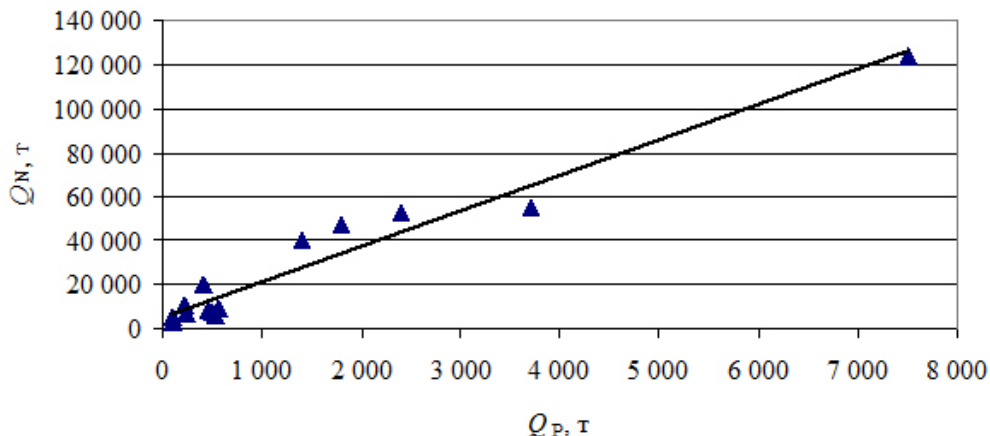


Рис. 3. Зависимость между поступлением в Балтийское море азота общего и фосфора общего со стоком трансграничных рек.

Литература

1. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. – СПб.: Наука, 2007 - 253 с.
2. Ландау М.А. Молекулярные механизмы действия физиологически активных соединений. – М.: Наука, 1981 – 262 с.
3. Морозова И.А., Шмидова Л.Б., Талалаев С.М. Трансграничное загрязнение Балтийского моря. – СПб.: СПбГТУ, 2000. – 52 с.
4. Фрумин Г.Т., Степанова Е.В. Квотирование биогенной нагрузки на Балтийское море // Сб. тезисов IX Междунар. экологического форума «День Балтийского моря». – СПб.: Изд-во «ДИАЛОГ», 2008, с. 318-319.
5. Хунфер П. Балтика – маленькое море, большие проблемы. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 136 с.
6. Цветков В.Ю., Сорокин И.Н. Финский залив – природный и морехозяйственный комплекс России. – СПб.: Институт озерадения РАН, НОУ ДПО «ИПК «Прикладная экология», 2009. – 223 с.