

Раздел V. Математическое моделирование экосистем

УДК: 57.033

А.Ю. Гусева, Н.В. Гусакова

РАСЧЕТ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ДОПУСТИМЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ БИОГЕНОВ В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ АЗОВСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ ЭВТРОФИРОВАНИЯ

Главная задача экологического нормирования – сохранение установившегося в биосфере экологического равновесия и механизмов саморегуляции экосистем при антропогенных воздействиях. Экологические нормативы принципиально отличны от санитарно-гигиенических и рыбохозяйственных ПДК. ЭДК – это экологически допустимые концентрации вредных веществ в окружающей среде, поступающих от антропогенных источников в количестве, не нарушающем гомеостатические механизмы саморегуляции экосистем. В работе рассчитаны экологически допустимые концентрации биогенов (нитритов, нитратов, аммоний иона и фосфатов) для северо-восточной части Таганрогского залива Азовского моря на основе разработанной статистической модели эвтрофирования. Также на основе полученных ЭДК рассчитан экологический резерв залива для этих веществ. Произведена оценка трофического статуса вод Таганрогского залива.

Концентрации биогенов; эвтрофирование; Таганрогский залив.

A.Y. Guseva, N.V. Gusakova

THE ESTIMATION OF THE BIOGENS' ECOLOGY ALLOWABLE CONTENTS IN THE TAGANROG BAY OF THE AZOV SEA BASED ON THE DEVELOPED EUTROPHICATION MODEL

The main task of the ecological control is the preservation of the ecological balance established in the biosphere and the preservation of the ecosystems regulation mechanisms during the human's influence. Ecological standards are very different from the sanitary-hygienic and fish-protecting standards. EAC are the ecology allowable contents of the harmful substances in the environment coming from different anthropogenic sources in quantity which wouldn't break homeostasis mechanisms of the ecosystems regulation. So in the work have been calculated the ecology allowable contents of the biogens (nitrites, nitrates, ammonium and phosphates) for the north-east part of the Taganrog bay of the Azov Sea based on the designed eutrophication model. The ecology reserve of the bay has also been calculated for this biogens on basis of the EAC data. The estimation of the Taganrog bay waters has been made from the environmental point of view.

Biogens' contents; eutrophication; Taganrog bay.

Практически во всех странах разработаны государственные санитарно-гигиенические стандарты (ПДК), ограничивающие содержание загрязняющих веществ в природных или сточных водах. Такой санитарно-гигиенический подход, когда главным критерием служит степень воздействия на здоровье человека, породил большое количество систем оценки качества природных вод с позиций их пригодности для того или иного вида водопользования.

Одной из главных причин прогрессирующего ухудшения качества самых доступных водных ресурсов является то, что гигиенические нормативы и самые совершенные технологии не обеспечивают в достаточной степени экологическую

безопасность водных экосистем. Даже при строгом соблюдении ПДК часто нарушаются внутриводоемные процессы и функции биоценозов, вследствие чего возникают вторичные негативные эффекты, качество воды ухудшается, водоемы деградируют и теряют ресурсную ценность [1].

Разработка нормативов, обеспечивающих экологическую безопасность природных экосистем, является первоочередной задачей. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в экосистемах по аналогии с ПДК можно назвать ЭДК. ЭДК – это экологически допустимые концентрации вредных веществ в окружающей среде (в нашем случае – в природных водах), поступающих от антропогенных источников и не нарушающие гомеостатические механизмы саморегуляции экосистем.

Расчеты ЭДК для водоемов должны основываться на использовании показателя, интегрально отражающего экологическое состояние водной системы на надорганизменном уровне. Диагноз экологического состояния водоемов не может быть сведен к сумме традиционных характеристик неживых и живых компонентов системы. Анализ банков данных даже многолетней динамики сотен отдельных гидрохимических и гидробиологических показателей не может дать адекватного описания функционирования экосистемы. Необходим критерий, интегрально отражающий функции и реакцию на стресс всей системы в целом с учетом ее эмерджентных свойств.

Экологические нормативы принципиально отличны от санитарно-гигиенических и рыбохозяйственных ПДК: цель санитарных норм и регламентов – охрана здоровья населения и отдельных популяций живых организмов. Задача же экологического нормирования – обеспечение экологической безопасности водных систем в целом (в том числе и здоровья человека), а его предназначение – сохранение установившегося в биосфере экологического равновесия и механизмов саморегуляции экосистем при антропогенных воздействиях. Применительно к гидросфере это, в первую очередь, относится к наиболее очевидному нарушению равновесия – антропогенному эвтрофированию.

Расчеты ЭДК для Таганрогского залива основывались на уравнении трофности [2] и уравнениях разработанной впервые эмпирико-статистической модели эвтрофирования Таганрогского залива. За основу была взята модель линейной множественной регрессии, общее назначение множественной регрессии состоит в анализе связи между независимыми переменными и зависимой переменной (откликом системы).

За основные параметры, определяющие состояние трофности водоема (независимые переменные), приняты: концентрации нитритов, нитратов, аммония, фосфатов, интегрирующие поступления их как от внешних, так и от внутренних источников, температура воды и соленость, скорость течения [3]; ответная реакция водоема регистрировалась по интегральному показателю T [4].

Для оценки роли каждого параметра в эвтрофировании и выбора из них приоритетных проверяли предварительно наличие корреляции (табл. 1) между главной зависимой переменной $T_{\text{стат}}$ и этими факторами (на основе базы данных Азовморинформцентра).

Коэффициенты корреляции между парами предикторов малы, следовательно, между ними в модели нет квадратичной зависимости, и эти факторы подходят для построения модели.

Проведенный корреляционный анализ подтвердил, что эвтрофирование зависит от концентрации биогенных веществ, а также в значительной степени определяется температурой воды и соленостью. Наличие тесной парной корреляции ме-

жду T и входными параметрами позволяет использовать в качестве модели эвтрофирования линейное уравнение множественной регрессии:

$$T_{\text{стат.}} = 8,817 - 0,927[\text{NH}_4^+] + 1,0102[\text{NO}_2] - 0,128[\text{NO}_3] - 1,171[\text{P}] - 0,03[t] + 0,219[\text{C}], \quad (1)$$

где $[\text{NH}_4^+]$ – концентрация азота аммонийного, мг/л, $[\text{NO}_2]$ – концентрация нитритов, мг/л, $[\text{NO}_3]$ – концентрация нитратов, мг/л, $[\text{P}]$ – концентрация фосфорсодержащих соединений, мг/л; t – температура воды, $^{\circ}\text{C}$; C – соленость, ‰.

Таблица 1

Зависимость трофического состояния Таганрогского залива $T_{\text{стат.}}$ от каждого из основных абиотических факторов

Абиотические факторы	Коэффициент корреляции	Уравнения
Температура воды, $^{\circ}\text{C}$	0,181	$y = 0,013x + 7,92$
Концентрация аммоний иона, мг/л	0,479	$y = -1,62x + 8,414$
Концентрация нитритов, мг/л	0,398	$y = -4,778x + 8,338$
Концентрация нитратов, мг/л	0,369	$y = -0,117x + 8,287$
Концентрация фосфатов, мг/л	0,369	$y = -3,205x + 8,346$
Соленость, ‰	0,52	$y = 0,323x + 7,804$

Таблица 2

Зависимости между парами предикторов

Зависимость предикторов	Коэффициент корреляции	Уравнения
Температура от аммоний иона	0,327	$t = -8,462\text{NH}_3 + 20,787$
Температура от нитритов	0,416	$t = -38,253\text{NO}_2 + 21,261$
Температура от нитратов	0,557	$t = -1,352\text{NO}_3 + 20,875$
Температура от фосфатов	0,516	$t = -34,349\text{P} + 21,402$
Температура от солености	0,139	$t = 0,664\text{C} + 18,755$
Аммоний ион от нитритов	0,882	$\text{NH}_3 = 3,138\text{NO}_2 + 0,007365$
Аммоний ион от нитратов	0,237	$\text{NH}_3 = 0,022\text{NO}_3 + 0,129$
Аммоний ион от фосфатов	0,099	$\text{NH}_3 = 0,237\text{P} + 0,138$
Аммоний ион от солености	0,493	$\text{NH}_3 = -0,091\text{C} + 0,254$
Нитриты от нитратов	0,241	$\text{NO}_2 = 0,009436\text{NO}_3 + 0,036$
Нитриты от фосфатов	0,094	$\text{NO}_2 = 0,171\text{P} + 0,036$
Нитриты от солености	0,493	$\text{NO}_2 = -0,021\text{C} + 0,069$
Нитраты от фосфатов	0,096	$\text{NO}_3 = 2,609\text{P} + 0,869$
Нитраты от солености	0,493	$\text{NO}_3 = -0,286\text{C} + 1,336$
Фосфаты от солености	0,1	$\text{P} = -0,006046\text{C} + 0,062$

В данном уравнении скорость течения включена в значение свободного члена, так как Таганрогский залив является мелководным, на его территории преобладают сгонно-нагонные и круговые течения. Суммарная скорость течения очень маленькая, менее 0,02 м/с, для расчета ею можно пренебречь.

Модель разработана на основе базы данных среднемноголетних исследований по Таганрогскому заливу, выполняемых ФГУП «Азовморинформцентр» и МУП «Водоканал». Места отбора проб указаны на рис. 1.

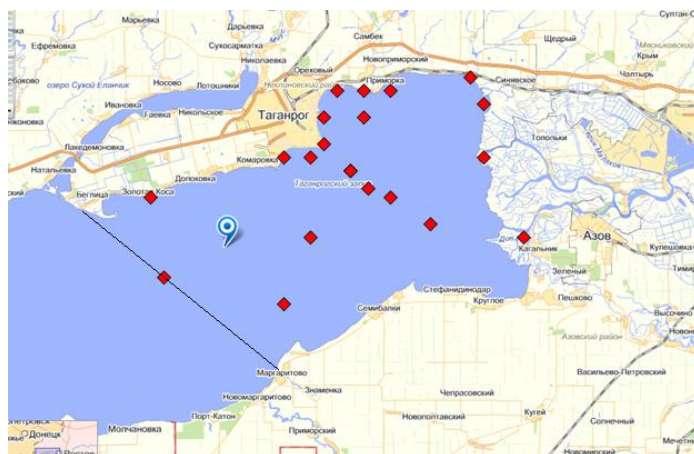


Рис. 1. Места отбора проб воды в северо-восточной части Таганрогского залива

В табл. 3 представлены критерии трофности – экспериментальный [4] и статистический (рассчитанный по модели).

Таблица 3

Критерии трофности – экспериментальный [4] и статистический (рассчитанный по модели)

Критерий трофности – экспериментальный	Критерий трофности – статистический
8,60	8,27
8,60	8,41
8,60	8,29
7,55	8,05
8,50	8,53
8,25	8,00
8,17	8,01
7,97	7,99
8,03	8,07
8,03	8,24
8,13	8,07
7,80	8,14
7,97	7,70
7,00	8,03
8,60	8,51
8,90	8,91

Для построенной модели коэффициент детерминации равен 0,84. Это означает, что данная модель учитывает основные факторы, оказывающие влияние на трофность водоема и объясняет ее изменение на 84 %. В остальные 16 % входят факторы и процессы, которые не учтены в разрабатываемой модели.

Таким образом, задавая нормативные для данного водоема значения интегрального показателя T^H можно записать [4]:

$$T^H > k_0 + k_1[NH^+_4] + k_2[NO_2] + k_3[NO_3] + k_4[P] + k_5[t] + k_6[C] \quad (2)$$

Тогда ЭДК(NH_4^+), ЭДК(NO_2^-), ЭДК(NO_3^-), ЭДК(P), ЭДК(t) и ЭДК(C) можно рассчитать по формулам:

$$\text{ЭДК}(\text{NH}_4^+) = [(T^H - k_0) - k_2[\text{NO}_2^-] - k_3[\text{NO}_3^-] - k_4[\text{P}] - k_5[t] - k_6[\text{C}]] / k_1 \quad (3)$$

$$\text{ЭДК}(\text{NO}_2^-) = [(T^H - k_0) - k_1[\text{NH}_4^+] - k_3[\text{NO}_3^-] - k_4[\text{P}] - k_5[t] - k_6[\text{C}]] / k_2 \quad (4)$$

$$\text{ЭДК}(\text{NO}_3^-) = [(T^H - k_0) - k_1[\text{NH}_4^+] - k_2[\text{NO}_2^-] - k_4[\text{P}] - k_5[t] - k_6[\text{C}]] / k_3 \quad (5)$$

$$\text{ЭДК}(\text{P}) = [(T^H - k_0) - k_1[\text{NH}_4^+] - k_2[\text{NO}_2^-] - k_3[\text{NO}_3^-] - k_5[t] - k_6[\text{C}]] / k_4 \quad (6)$$

Для Таганрогского залива уравнения принимают вид:

$$\text{ЭДК}(\text{NH}_4^+) = [(T^H - 8,817) - 1,0102 [\text{NO}_2^-] + 0,128 [\text{NO}_3^-] + 1,171 [\text{P}] + 0,03 [t] - 0,219 [\text{C}]] / -0,927 \quad (7)$$

$$\text{ЭДК}(\text{NO}_2^-) = [(T^H - 8,817) + 0,927 [\text{NH}_4^+] + 0,128 [\text{NO}_3^-] + 1,171 [\text{P}] + 0,03 [t] - 0,219 [\text{C}]] / 1,0102 \quad (8)$$

$$\text{ЭДК}(\text{NO}_3^-) = [(T^H - 8,817) + 0,927 [\text{NH}_4^+] - 1,0102 [\text{NO}_2^-] + 1,171 [\text{P}] + 0,03 [t] - 0,219 [\text{C}]] / -0,128 \quad (9)$$

$$\text{ЭДК}(\text{P}) = [(T^H - 8,817) + 0,927 [\text{NH}_4^+] - 1,0102 [\text{NO}_2^-] + 0,128 [\text{NO}_3^-] + 0,03 [t] - 0,219 [\text{C}]] / -1,171 \quad (10)$$

Для Таганрогского залива данные расчеты были выполнены впервые.

Известно, что показатель T в водоемах меняется от $T \leq 5,7$ (дистрофное состояние) до $T \geq 8,3$ [1]. В настоящее время в районе VIIIа Таганрогского залива значение показателя T в среднем составляет 8,04 (показатель рассчитан с помощью разработанной статистической модели эвтрофирования), что свидетельствует о мезотрофном состоянии водоема. Переход водоема в опасное эвтрофное состояние происходит при $T \geq 8,3$, которое и принимается за верхнюю границу нормативного: $T^H = 8,3$. При высоких значениях показателя T (данная ситуация возникает при загрязнении водоема биогенами) нарушение биотического баланса может стать необратимым и система деградирует.

Для расчета ЭДК были взяты средние концентрации биогенных веществ в водах района VIIIа Таганрогского залива за 2009 год:

Таблица 4

Средние концентрации биогенных веществ в Таганрогском заливе за 2009 г.

Температура воды, °C	Аммоний ион, мг/дм ³	Нитриты, мг/дм ³	Нитраты, мг/дм ³	Фосфаты, мг/дм ³	Соленость, ‰
19,68947	0,110158	0,0178	0,304211	0,053368	1,552632

Таким образом, становится возможным рассчитать ЭДК для средних концентраций данных показателей за 2009 год. Они составили: ЭДК(NH_4^+) = 0,197 г/дм³, ЭДК(NO_2^-) = 0,961 г/дм³, ЭДК(NO_3^-) = 0,936 г/дм³, ЭДК(P) = 0,122 г/дм³.

На основе полученных ЭДК произведены расчеты экологического резерва (ЭР) Таганрогского залива относительно биогенных веществ, которые также выполнены впервые.

При допущении, что $dC / dt = 0$, в первом приближении можно записать [2]:

$$\text{ЭР} = (\text{ЭДК}_i - C_i) \cdot Q \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

где ЭР – экологический резерв водного объекта, т/сут; ЭДК_{*i*} – экологически допустимая концентрация *i*-го вещества, г/м³; C_i – концентрация *i*-го вещества в воде водоема, г/м³; Q – суммарный расход воды, м³/сут.

Экологические резервы (ЭР) района VIIIа Таганрогского залива рассчитаны в местах выпусков сточных вод очистных сооружений МУП «Водоканал», где экосистема наиболее подвержена загрязнению и биогенной нагрузке.

В качестве исходных данных для расчетов использовались данные МУП «Водоканал» о сбросах биогенных веществ в Таганрогский залив. Для расчета экологических резервов взяты средние значения (табл. 5).

Среднегодовой суммарный расход воды в выпуске 1 составил 22123,38 тыс. м³ в год, в выпуске 2 – 158,275 м³.

Расчеты выполнялись по приведенным выше формулам: ЭДК(NH_4^+) – формула (3); ЭДК(NO_2^-) – формула (4); ЭДК(NO_3^-) – формула (5); ЭДК(P) – формула (6); ЭР – формула (11).

Таким образом, экологические резервы составили: $\text{ЭР}(\text{NH}_4^+) = -19,81$ т/год, $\text{ЭР}(\text{NO}_2^-) = 20,41$ т/год, $\text{ЭР}(\text{NO}_3^-) = -1388,95$ т/год, $\text{ЭР}(\text{P}) = -40,41$ т/год.

Таблица 5

Средние значения концентраций биогенных веществ, сброшенных в Таганрогский залив

Аммоний ион, мг/дм ³ Выпуск 1	Аммоний ион, мг/дм ³ Выпуск 2	Нитриты, мг/дм ³	Нитраты, мг/дм ³	Фосфаты, мг/дм ³
0,400375	0,69225	0,038775	63,71763	1,949063

Обобщенные результаты расчетов приведены в табл. 6.

Таблица 6

ЭДК и ЭР Таганрогского залива

ЭДК, мг/л				ЭР, т/год			
NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	P	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	P
0,197	0,961	0,936	0,122	-19,81	20,41	-1388,95	-40,41

На основе проведенных расчетов видно, что экологический резерв водоема практически уже превышен. Так, лишь ЭР для нитритов имеет положительное значение. Вывод: экологическая обстановка в Таганрогском заливе является критической и требует проведения мероприятий по снижению содержания биогенных веществ в его водах.

При решении проблемы необходимости и степени удаления биогенных веществ из сточных вод, в первую очередь, следует уделять внимание тем биогенным элементам, которые лимитируют эвтрофирование данной водной системы, т.е. фосфору и азоту (фосфатом и нитратам).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственный стандарт СССР «Охрана природы. Гидросфера использование и охрана вод. Основные термины и определения». ГОСТ 17.1.1.01-77 от 16 сентября 1977 г.
2. Цветкова Л.И., Копина Г.И., Неверова Е.В. Временные методические рекомендации по определению экологически допустимых концентраций (ЭДК) фосфора в воде водоема в целях предотвращения эвтрофирования.
3. Копылова А.Ю., Гусакова Н.В. Оценка трофического состояния вод Таганрогского залива в 2004 год. // Известия ТРТУ. – 2005. – № 9 (53). – С. 256-257.
4. Патент № 2050128 РФ, Роспатент. Способ определения экологического состояния пресноводных водоемов / Цветкова Л.И., Неверова Е.В., Копина Г.И., Пономарева В.Н. № 5044510; 20.12.1995 г.– Ленинград: Ленинградский инженерно-строительный институт, 1991.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

Гусева Алена Юрьевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: soleils@bk.ru; г. Таганрог, ул. Греческая, 62, кв. 15; тел.: +79185135505; кафедра химии и экологии; аспирант.

Гусакова Наталья Владимировна – e-mail: gnv2007@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79061834138; кафедра химии и экологии; к.п.н.; доцент.

Guseva Alain Yur'evna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: soleils@bk.ru; 62, Greek street, apt. 15, Taganrog, Russia; phone: +79185135505; the department of chemistry and ecology; postgraduate student.

Gusakova Natalia Vladimirovna – e-mail: gnv2007@yandex.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79061834138; the department of chemistry and ecology; cand. of ped sc.; associate professor.