

На правах рукописи

АНДРИАНОВА АНАСТАСИЯ БОРИСОВНА

**ГЕОГРАФО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АНТРОПОГЕННОГО
ДАВЛЕНИЯ НА ВОДОСБОРНЫЕ И ВОДНЫЕ БАССЕЙНЫ**

Специальность 25.00.36 – Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург
2005

Работа выполнена на кафедре прикладной экологии Российского государственного гидрометеорологического университета

Научные руководители:

доктор химических наук, профессор
доктор географических наук

Фрумин Г.Т.
Рянжин С.В.

Официальные оппоненты:

доктор географических наук
доктор биологических наук

Егоров А.Н.
Коровин Л.К.


Ведущая организация: Государственный гидрологический институт

Защита состоится "22" декабря 2005 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.197.03 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, пр. Металлистов, д.3, аудитория 406^Б

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан "22" ноября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Бескид П.П.

2006-4
24958

2239519

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В последнее время все большее внимание уделяется негативным (проблемным) гидроэкологическим ситуациям, под которыми понимаются важные для жизни и деятельности людей, функционирования экологических систем состояния вод и связанных с ними других компонентов природы. Такое положение обусловлено ключевой ролью водного компонента окружающей природной среды и появлением всевозрастающего числа симптомов, свидетельствующих о его неблагополучии во многих районах мира и нашей страны.

При выявлении причин негативных гидроэкологических ситуаций следует учитывать, что водные объекты представляют собой гидрологические системы, неразрывно связанные с водными ресурсами водосборов, и служат, таким образом, индикаторами состояния геосистем суши. Результаты современных исследований свидетельствуют о том, что первопричинами большинства гидроэкологических кризисов чаще всего бывают процессы, происходящие на их водосборах.

Экологическая значимость водосбора для водных объектов определяется суммой характеристик, отражающих его физико-географические, социально-политические и экономико-хозяйственные особенности. Однако до их пор остается неясным, какие из этих характеристик являются наиболее информативными (наиболее значимыми) при установлении количественных соотношений между характеристиками водосборов и качеством вод различных водных объектов.

В связи с изложенным всесторонний анализ водосборных и водных бассейнов представляет собой **актуальную задачу**, так как при успешном ее решении оказывается возможным установить первопричины экологических изменений, осуществить прогноз состояния водных экосистем, провести необходимые природоохранные мероприятия и разработать систему управления антропогенными нагрузками на прибрежные регионы.

Цель диссертационного исследования состояла в разработке новых интегральных подходов к оценке антропогенного воздействия на водосборные и водные бассейны различных водных объектов (озер, водохранилищ, морей). Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- создать базу данных, содержащую сведения о морфометрических, гидрографических, административно-территориальных, гидрохимических и гидробиологических характеристиках водных объектов и их водосборных бассейнов;
- обосновать наиболее информативный показатель антропогенного воздействия на водосборные бассейны;
- выявить количественные соотношения между антропогенным воздействием (давлением) на водосборные бассейны различных водных объектов и качеством их вод;



- разработать новый подход к оценке антропогенной и природной составляющих поступления биогенных элементов в Балтийское море, в озера и водохранилища мира.

Научная новизна работы.

1. Установлено, что коэффициенты антропогенного давления, рассчитываемые по данным о плотности населения, являются интегральными показателями антропогенного воздействия на водосборы различных водных объектов (озер, водохранилищ, морей).
2. Предложено два подхода к анализу водосборных бассейнов. Первый базируется на оценке антропогенного давления на различные территории, включая водосборные бассейны, второй - на оценке информационной энтропии конечного ансамбля событий Шеннона.
3. Выявлены значимые регрессионные уравнения, связывающие коэффициенты антропогенного давления на водосборы озер и водохранилищ с их гидрохимическими, гидробиологическими и биохимическими характеристиками.
4. Проведена количественная оценка антропогенного давления на различные суббассейны Балтийского моря (для водосборов стран бассейна Финского залива, Ботнического залива, Рижского залива, Западной и Центральной Балтики).
5. Предложен новый способ оценки антропогенной и природной составляющих поступления биогенных элементов в Балтийское море и пресноводные озера.

Практическая значимость. Результаты работы позволяют выработать рекомендации по природоохранным мероприятиям, направленным на управление антропогенными нагрузками, и обеспечивающим сохранение водных объектов на олиготрофном или мезотрофном уровнях и ограничивающим их переход в эвтрофное состояние.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Коэффициент антропогенного давления – интегральный показатель антропогенного воздействия на различные территории (стран, городов, водосборных бассейнов).
2. Количественные соотношения между коэффициентами антропогенного давления и гидрохимическими, гидробиологическими и биохимическими показателями состава и свойств вод водных объектов (озер, водохранилищ).
3. Новый подход к оценке природной и антропогенной составляющих поступления биогенных элементов в водные объекты.
4. Российская Федерация по сравнению с другими странами не оказывает наибольшего антропогенного давления ни на один из суббассейнов Балтийского моря.

Достоверность научных положений и выводов обусловлена применением современных методов математико-статистической обработки данных, проведением натурных исследований, и подтверждается полученными результатами:

Личный вклад автора заключается в участии в создании базы данных, содержащей сведения о морфометрических, гидрографических, административно-территориальных, гидрохимических и гидробиологических характеристиках водных объектов и их водосборных бассейнов; в постановке проблемы, методическом обеспечении ее решения и анализе полученных результатов.

Апробация работы. Результаты исследования докладывались и обсуждались: на итоговых сессиях Ученого Совета Российского Государственного Гидрометеорологического Университета (Санкт-Петербург, 2004, 2005); на V и VI международных экологических форумах "День Балтийского моря" (Санкт-Петербург, 2004, 2005); на VII международной специализированной выставке и конференции "Акватерра-2004" (Санкт-Петербург, 2004); на SEGUE's 2nd Follow-up Seminar (Хельсинки, Финляндия, 2005); на III международной конференции "Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон" (Санкт-Петербург, 2005).

Материалы диссертации изложены в 10 публикациях, одна из них – в журнале "Экологическая химия", реферируемом в России (РЖ "Геофизика" и "Химия") и США ("Chemical Abstracts").

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 184 страницах машинописного текста, включает 70 таблиц, 73 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 151 публикацию, в том числе 22 иностранных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, определена цель исследования, показана научная новизна и практическая значимость исследования.

В **первой главе "Водный объект и его водосбор – единая природная система"** проведен анализ данных литературы о загрязнении водных объектов и их эвтрофировании. Последовательно рассмотрены лимнические, морские и речные экосистемы. Показано, что в настоящее время понятие "водный объект как составная часть ландшафта" получило всеобщее признание, так как при современном уровне наших знаний трудно найти правильное объяснение процессов, происходящих в водных объектах, в отрыве от изучения их водосборных бассейнов. Рассмотрены различные индексы, используемые для оценки антропогенного воздействия на водосборные бассейны. В частности, "индекс антропогенной нагрузки на водные ресурсы водосбора" (*АНВР*) (Коронкевич и др., 1995). Этот индекс представляет собой отношение плотности населения к среднегодовому слою стока с территории и позволяет установить, сколько жителей приходится на единицу объема стока, то есть охарактеризовать одним показателем гидролого-климатические и социальные особенности влияния водосбора на водный объект. При анализе данных литературы особое внимание было уделено оценке природной и антропогенной

составляющих биогенного стока рек. Количественное определение антропогенной составляющей биогенного стока рек и ее многолетней динамики необходимо для оценки существующего положения и прогнозирования эвтрофирования конечных водоемов. Наиболее показательным индикатором антропогенного поступления азота и фосфора в водотоки и водоемы может быть их отношение к минеральному растворенному кремнию, как реперу, содержание которого за счет антропогенных факторов не возрастает (Максимова, 1979). Постоянство величин соотношения биогенных элементов Si/N и Si/P в речном стоке, не загрязненном антропогенными добавками азота и фосфора позволяет использовать эти соотношения в качестве фоновых эмпирических коэффициентов для расчета антропогенной составляющей биогенного стока рек. Некоторое неудобство составляет лишь необходимость получения фоновых коэффициентов для каждой реки на основе ряда наблюдений по биогенному стоку в период, предшествующий антропогенному воздействию.

Во второй главе "Материалы и методы исследования" приведены современные математико-статистические методы обработки данных с использованием пакета статистических программ Statistica 5.5 и табличного процессора Microsoft Excel, использованные в диссертационной работе.

Статистическая значимость регрессионных коэффициентов оценивалась с помощью сравнения полученных t -критериев Стьюдента с табличными значениями для разных уровней значимости при $(N-k-1)$ степенях свободы, где N — число наблюдений (число значений, данные для которых использовались при получении уравнений); k — число входящих в уравнение параметров. Статистическая значимость полученного уравнения оценивалась аналогичным образом с помощью вычисленного F -критерия Фишера при рассмотрении $k/(N-k-1)$ степеней свободы. В данном исследовании в большинстве случаев использованы линейные зависимости между переменными. В работе (Дружинин, Сикан, 2001), отмечается, что уравнение можно рекомендовать для практических расчетов, если выполнены следующие условия:

$$n \geq 10; |r| \geq 0,7; |r|/\sigma_r \geq 2; |a|/\sigma_a \geq 2, \quad (1)$$

где n — объем выборки, r — коэффициент парной корреляции; σ_r — стандартная ошибка коэффициента парной корреляции; σ_a — стандартная ошибка коэффициента регрессии.

В ряде случаев при отсутствии достаточного количества данных условия (1) были использованы нами в качестве первого приближения и при $n < 10$.

При анализе регрессионных зависимостей проводились исследования на стационарность: теснота связи и коэффициенты регрессии не должны существенно меняться с изменением объема выборки или от выборки к выборке. Для этого производилось определение параметров уравнения регрессии по различным выборкам из имеющихся рядов наблюдений Y и X и проверка их равенства, исходя из нулевой гипотезы, $H_0 : r_1 = r_2$, где r_1 — коэффициент корреляции по одной выборке значений Y и X , а r_2 — по другой.

Другой подход к анализу водосборных бассейнов, использованный в данной работе, базировался на оценке информационной энтропии конечного

ансамбля событий Шеннона (Антомонов, 1977; Терещенко и др., 1994; Алимов, 2000):

$$H = - \sum p_i \log_2 p_i \quad (2)$$

характеризующей степень разнообразия состояний системы (водосборного бассейна), при дополнительных условиях: $0 \leq p_i \leq 1$ и $\sum p_i = 1$ (\sum от $i = 1$ до $i = n$, n – число событий-признаков последовательности состояний, которые определяют пространство возможных дискретных значений), p_i – вероятность появления i -го события-признака. Величины p_i определяются из данных о площадях урбанизированных территорий, лесов, распаханых земель, водных объектов, болот и увлажненных земель (доли водосбора) на водосборных суббассейнах различных стран. Под величиной H понимается мера информации, которую получают при реализации исследуемого состояния сложной многокомпонентной системы, в нашем случае это водосборный бассейн. Для оценки относительной организации водосборного бассейна (R) были использованы следующие формулы:

$$R = 1 - H/H_{max} \quad (3)$$

$$H_{max} = \log_2 N \quad (4)$$

где N – общее количество характеристик водосборного бассейна (в нашем случае $N = 6$). Относительная организация системы (водосбора), определяемая величиной R , лежит в пределах $0 \leftarrow R \leftarrow 1$.

Для проведения исследований, связанных с оценкой антропогенного воздействия на водосборные и водные бассейны различных водных объектов нами была создана база данных по озерам и водохранилищам мира. В качестве основы для формирования базы были взяты данные многолетних исследований озер, водохранилищ и их водосборных бассейнов, собранные международным лимнологическим комитетом (ILEC – International Lake Environment Committee) в рамках международной экологической программы UNEP (United Nation Environment Programme) при участии правительства Японии. Первичные данные представляют собой сборник сведений о географических, морфометрических, климатических, гидрохимических и гидробиологических, социо-экономических и других параметрах водных объектов и их водосборов. Сведения содержатся в виде текстовых файлов, обработка которых математическими и статистическими методами без написания специальной программы невозможна. Количество описанных водных объектов превышает 500 ед., каждому объекту присвоен индивидуальный индекс, состоящий из трех первых букв названия территории и порядкового номера, например: EUR-04 соответствует озеру Балатон, находящемуся в Венгрии. Всего выбрано 5 регионов: AFR=Африка, ASI=Азия, EUR=Европа, NAM=Северная Америка, SAM=Южная Америка, OCE=Океания. Предложенные международным лимнологическим комитетом индексы были выбраны нами в качестве "первичного ключа таблицы" уникально идентифицирующего строку. Данные приведены за период с 1970-х по 1990-е годы. Приведена годовая динамика изменения ряда параметров (например: температура воды, pH, содержание растворенного кислорода, содержание хлорофилла, общего азота, фосфора и др.) по глубине. Однако для некоторых объектов описание целого ряда

характеристик отсутствует. Структурно база данных представляет собой двумерную таблицу, состоящую из строк (записей) и столбцов (полей). Названия полей соответствуют характеристикам водных объектов. Реализована база данных с помощью табличного редактора Microsoft Excel, позволяющего производить математико-статистический анализ данных, составлять запросы на языке Visual Basic и импортировать данные в другие специализированные программы. Общий объем базы данных составляет 300 кб. Количество полей базы данных 37, количество записей 217 (Европа (EUR) – 56 водных объектов, Азия (ASI) – 64, Океания (OCE) – 4, Северная Америка (NAM) – 61, Южная Америка (SAM) – 12, Африка (AFR) – 20). Кроме того, в диссертации использованы и другие данные отечественной и зарубежной литературы, содержащие гидрологические (речная сеть), административно-территориальные (наличие развитых стран, крупных городов, плотность населения) и производственно-хозяйственные сведения о территориях водосборных бассейнов различных стран, а также Балтийского моря. Наряду с этим были рассмотрены гидрологические, морфометрические, гидрографические, гидрохимические и гидробиологические показатели состава и свойств вод озер, водохранилищ, морей (на примере Балтийского моря).

В главе "Коэффициенты антропогенного давления на территории стран мира" использована идея В.М. Котлякова и соавторов (Котляков, Лосев, Суетова, 1995), согласно которой любые современные технологии направлены на все более эффективное использование природных ресурсов (потребление и разрушение биомассы для удовлетворения потребностей человека) и тем самым – на перестройку окружающей среды. Чем больше численность населения и выше его потребности, тем больше затрачивается энергии в процессе использования технологий для получения продуктов потребления. Любые современные технологии, призванные, так или иначе, использовать природные ресурсы, направлены на перестройку окружающей среды, потребление биомассы и первичной биологической продукции. В результате применения технологий происходит деформация окружающей среды, возникают локальные, региональные и глобальные ее нарушения. Так как в основе любой технологии лежит потребление энергии, поэтому удельное потребление энергии (на единицу территории страны) может быть использовано с достаточной степенью надежности как показатель антропогенного воздействия на экосистемы, роли хозяйственной деятельности в их разрушении. Коэффициент антропогенного давления (K) получен отнесением величины энергетической мощности на единицу площади к средней глобальной мощности на единицу площади.

В развитие вышеизложенного нами была высказана гипотеза о том, что коэффициенты антропогенного давления, рассчитываемые по данным об энергопотреблении, связаны с плотностью населения. Сведения об энергопотреблении в различных странах мира, населении этих стран и площади территории заимствованы из литературных источников.

Для проведения статистического анализа исследуемых данных значения плотности населения в различных странах мира были приведены к безразмерному виду:

$$ПН^* = \frac{ПН}{ПН_{ср\ мир}}, \quad (5)$$

где: $ПН^*$ – безразмерная плотность населения в данной стране; $ПН$ – плотность населения в данной стране; $ПН_{ср\ мир}$ – среднемировая плотность населения ($41,6 \text{ чел./км}^2$).

Для определения функциональной связи между коэффициентами антропогенного давления и плотностью населения, исследуемые данные были подвергнуты регрессионному анализу. В качестве переменных при анализе были использованы прологарифмированные значения K и безразмерная плотность населения $ПН^*$. Уровень значимости при проведении анализа был принят равным 95 %. Расчет производился для 185 стран мира (38 европейских стран, 49 азиатских стран, 47 стран на африканском континенте, 38 стран в Северной и Южной Америке, 12 стран – в Австралии и Океании). Причем среднемировое энергопотребление получилось равным $92073 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км}^2$. Значения K изменяются в широких пределах: от 714 и 499 для Макао и Сингапура до 0,0006 и 0,0009 для Бенина и Чада соответственно. При этом значения $K=1$, характеризуют страны с энергопотреблением, равным среднемировому. Среднемировое значение коэффициента антропогенного давления равно 11,92.

По величинам среднего значения коэффициента антропогенного давления группы стран могут быть ранжированы следующим образом:

Азия ($K_{ср}=36,3$) > Европа ($K_{ср}=7,3$) > Америка ($K_{ср}=2,7$) > Австралия и Океания ($K_{ср}=2,3$) > Африка ($K_{ср}=0,4$). Видно, что наибольшее воздействие на окружающую среду оказывают "азиатские" страны. При этом в группе европейских стран Россия имеет наименьший коэффициент антропогенного давления на природу.

Следует отметить, что коэффициент антропогенного давления, позволяя ранжировать все государства и любые другие территории по степени их нарушенности хозяйственной деятельностью человеком, вместе с тем не полностью учитывает степень нарушения. В первую очередь это касается многих африканских и других стран тропической зоны, где с ростом населения постоянно уничтожаются леса путем их выжигания для расширения площади сельскохозяйственных земель. В статистике энергетики этот процесс не учитывается. Для проведения анализа и выявления общей закономерности нами были выбраны 108 стран из 185. Зависимость коэффициента антропогенного давления от плотности населения показана на рис. 1.

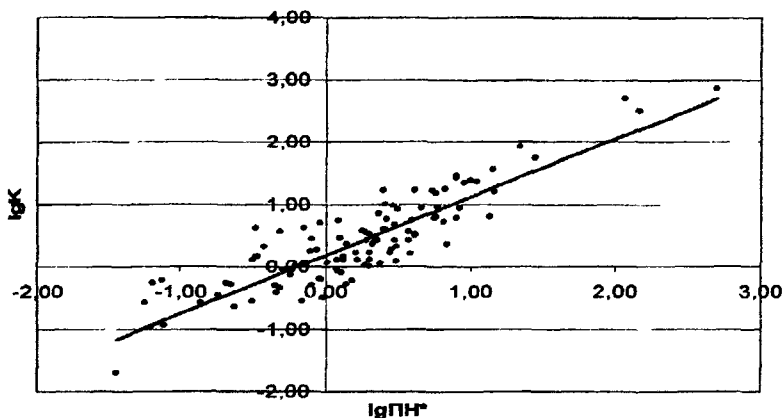


Рис. 1. Зависимость коэффициента антропогенного давления (K) от безразмерной плотности населения ($ПН^*$)

Полученная корреляционная зависимость имеет вид:

$$\lg K = 0,19 + 0,93 \cdot \lg ПН^*, \quad (6)$$

Таблица 1. Параметры уравнения линейной регрессии для зависимости (6)

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
n	108	$\sigma_{y(x)}$	0,35	a/σ_a	19,1
r	0,88	σ_r	0,022	b/σ_b	5,4
r^2	0,77	σ_a	0,049	F_P	357,3
a	0,93	σ_b	0,036	F_T	3,94
b	0,19	r/σ_r	39,9	F_P/F_T	90,7

Примечание. n – количество наблюдений, r – коэффициент корреляции, r^2 – коэффициент детерминации, a и b – коэффициенты уравнения регрессии, $\sigma_{y(x)}$ – стандартная ошибка уравнения линейной регрессии, F_P и F_T – расчетное и табличное значения критерия Фишера для $\alpha = 5\%$.

Исследование остатков модели показало, что они хаотично разбросаны относительно прямой, в их поведении нет закономерностей. Нет оснований утверждать, что остатки коррелированы между собой, нет также резко выделяющихся остатков. Отсюда можно заключить, что связь является статистически значимой. Исследование стационарности связи показало, что условие равенства выборочных коэффициентов регрессии выполняется.

В первом приближении рассматриваемое уравнение может быть полезно при оценке антропогенного воздействия на водосборные бассейны морей, озер, рек и водохранилищ. При этом коэффициент антропогенного давления будет определяться плотностью населения на водосборной территории.

Для иллюстрации приводим выявленное нами количественное соотношение между логарифмами значений выбросов углекислого газа на 1 км² территории различных стран и логарифмами коэффициентов антропогенного давления на территории этих стран (рис. 2).

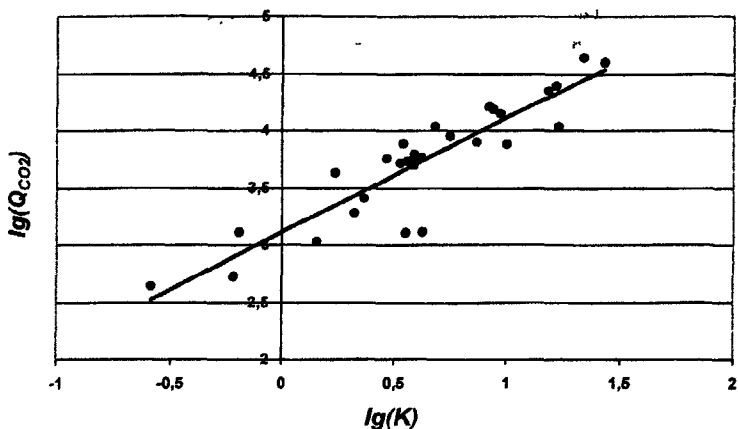


Рис. 2. Зависимость выбросов CO_2 на 1 км^2 территории различных стран (Q_{CO_2}) от коэффициента антропогенного давления (K^*).

$$\lg(Q_{CO_2}) = 3,11 + \lg K^*, \quad (7)$$

Данная зависимость имеет следующие статистические характеристики: количество стран $n=29$; коэффициент корреляции $r=0,91$; коэффициент детерминации $r^2=0,83$; расчетное значение критерия Фишера $F_p=120,21$; табличное значение критерия Фишера $F_T=4,49$.

На основании результатов, полученных при анализе данных о коэффициентах антропогенного давления на территории различных стран и плотности населения в данных странах, представлялось целесообразным установить количественные зависимости между антропогенной нагрузкой на водосборные бассейны озер и водохранилищ и качеством их вод, оцениваемым по гидрохимическим и гидробиологическим показателям.

В главе "Антропогенное давление на водосборы морей (на примере Балтийского моря)" приведено физико-географическое описание Балтийского моря и выявлены количественные соотношения между потоками серы, окисленного и восстановленного азота (Q , тонн) на Балтийское море от различных стран и коэффициентами антропогенного давления на их территории (K) (табл. 2). Для оценки антропогенного воздействия на водосборные суббассейны Балтийского моря было использовано полученное нами уравнение (6).

Таблица 2. Количественные соотношения между потоками серы, окисленного и восстановленного азота (Q , тонн) на Балтийское море от различных стран и коэффициентами антропогенного давления на их территории (K)

Вещество	Уравнение регрессии	Статистические характеристики					
		n	r	r^2	$\sigma_{y(x)}$	F_p	F_T
N-NH ₃	$Q = -0,92 + 2,62K$	12	0,84	0,71	3,57	24,87	4,96
N-NO _x	$Q = 1,78 + 2,35K$	11	0,74	0,54	6,12	10,61	5,12
S-SO ₂	$Q = -4,29 + 6,60K$	12	0,65	0,42	20,1	7,33	4,96

Использование коэффициентов антропогенного давления (K^*) позволило выявить значимые зависимости между поступлением биогенных элементов в Балтийское море со стоком рек (табл. 3).

Таблица 3. Количественные соотношения между поступлением в Балтийское море биогенных элементов со стоком рек с территорий различных стран (Q , кг/км²) и коэффициентами антропогенного давления (K^*) (средние значения за период с 1994 г. по 1998 г.)

Вещество	Уравнение регрессии	Статистические характеристики					
		n	r	r^2	$\sigma_{y(x)}$	F_p	F_T
Ровщ	$Q_p = 4 + 10,6K^*$	9	0,83	0,69	12,9	15,6	5,32
Новщ	$Q_N = 277 + 245K^*$	9	0,67	0,46	487	6,0	5,32

Примеры, приведенные выше, свидетельствуют о том, что коэффициент антропогенного давления (K^*) является высокоинформативным интегральным показателем антропогенной нагрузки. В связи с изложенным, мы сочли целесообразным рассчитать величины K^* для отдельных суббассейнов стран Балтийского моря (табл. 4).

Таблица 4. Коэффициенты антропогенного давления на суббассейны Балтийского моря (K^*)

Страна	Центральная Балтика	Финский залив	Рижский залив	Ботническое море	Ботнический залив	Западная Балтика	Пролив Каттегат
Германия	3,04	-	-	-	-	5,30	-
Дания	2,47	-	-	-	-	4,41	3,24
Латвия	1,07	0,56	1,67	-	-	-	-
Литва	2,28	-	1,08	-	-	-	-
Польша	4,21	-	-	-	-	-	-
Россия	2,13	1,11	0,27	-	-	-	-
Финляндия	-	0,92	-	0,93	0,30	-	-
Швеция	1,82	-	-	0,26	0,13	-	1,14
Эстония	0,38	1,77	0,67	-	-	-	-

Как следует из приведенных данных, ни на один из суббассейнов Балтики Россия не оказывает наибольшего антропогенного давления по сравнению с другими сравниваемыми странами. Полученный результат имеет принципиальное значение, так как, хотя и косвенно, но опровергает утверждения зарубежных специалистов о том, что Санкт-Петербург является

основным загрязнителем Балтийского моря. Мы считаем, что это утверждение до настоящего времени не имеет корректного научного обоснования.

Использование коэффициента антропогенного давления (K^*) позволило выявить количественные зависимости вида $Q=a+bK^*$ между поступлением биогенных элементов в Балтийское море с единицы территории суббассейнов различных стран (Q , кг/км²) и коэффициентами антропогенного давления на территории суббассейнов данных стран. Исследование статистических характеристик уравнений показало, что все уравнения регрессии являются значимыми. Этот результат позволил нам предложить **новый способ раздельной оценки антропогенной и природной составляющих поступления биогенных элементов в Балтийское море**. Действительно, если $K^*=0$ (отсутствие антропогенного воздействия), то величины Q_P (Q_N) численно равны величинам свободного члена уравнения a , то есть природному (фоновому) поступлению. Таким образом, используя уравнения, приведенные в табл. 3, приходим к выводу, что природное (фоновое) поступление общего фосфора с водосбора Балтийского моря составляет 4 кг/км², а общего азота – 277 кг/км².

Выявленные значения природного (фонового) поступления биогенных элементов совместно с уравнениями, приведенными в табл. 3, позволили рассчитать природную и антропогенную составляющие поступления биогенных элементов в Балтийское море со стоком рек (табл. 5).

Таблица 5. Природные и антропогенные составляющие биогенного стока рек в Балтийское море, %

Страна	Общий фосфор		Общий азот	
	природная составляющая	антропогенная составляющая	природная составляющая	антропогенная составляющая
Швеция	37,8	62,2	64,6	35,4
Финляндия	36,7	63,3	63,5	36,5
Россия	25,5	74,5	50,6	49,4
Эстония	22,4	77,6	46,3	53,7
Латвия	19,9	80,1	42,7	57,3
Литва	15,4	84,6	35,2	64,8
Германия	8,6	91,4	22,0	78,0
Польша	8,2	91,8	21,2	78,8
Дания	6,8	93,2	18,1	81,9

Результаты расчетов показывают, что чем выше коэффициенты антропогенного давления на водосборный бассейн, тем меньше природная и больше антропогенная составляющие биогенного стока рек в Балтийское море. Этот результат иллюстрируется на рис. 3.

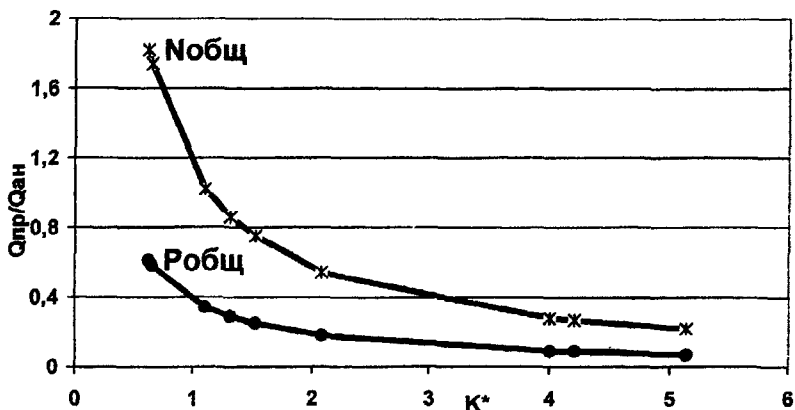


Рис. 3. Отношение природной составляющей к антропогенной составляющей биогенного стока рек в Балтийское море (усредненные данные за период 1994-1998 гг.).

Другой подход к анализу водосборных бассейнов заключается в оценке относительной организации водосборного бассейна R (формулы 2-4). Первичные данные для оценок величин H , H_{max} и R были заимствованы из работы (Baltic Sea..., 1998) (табл. 6).

Таблица 6. Структура водосборных бассейнов стран Балтийского моря

Страна	Урбанизированные территории	Леса	Распаханные земли	Озера	Болота	Другие территории
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
Дания	0,14	0,16	0,66	0,01	0,01	0,02
Эстония	0,03	0,44	0,30	0,05	0,17	0,01
Финляндия	0,02	0,51	0,07	0,10	0,27	0,03
Германия	0,04	0,15	0,72	0,04	-	0,05
Латвия	0,02	0,44	0,39	0,01	0,05	0,09
Литва	0,05	0,31	0,54	0,04	0,02	0,04
Польша	0,06	0,29	0,60	0,03	-	0,02
Россия	0,02	0,55	0,12	0,17	0,13	0,01
Швеция	0,03	0,70	0,06	0,08	0,12	0,01

В табл. 7 приведены рассчитанные нами значения величин H , H_{max} и R . В этой же таблице указаны величины K^* , рассчитанные по данным о плотности населения в суббассейнах различных стран.

Таблица 7. Относительная организация суббассейнов стран Балтийского моря

Страна	H	H_{max}	R	K^*
Германия	1,34	2,59	0,48	4,00
Дания	1,46	2,59	0,43	5,12
Швеция	1,48	2,59	0,43	2,04
Польша	1,47	2,59	0,43	4,21
Литва	1,70	2,59	0,34	2,07
Латвия	1,76	2,59	0,32	1,52
Россия	1,8380	2,59	0,29	1,10
Финляндия	1,8709	2,59	0,28	0,65
Эстония	1,9111	2,59	0,26	1,31

Сопоставление коэффициентов антропогенного давления на водосборные бассейны различных стран с другими характеристиками водосборных бассейнов позволило выявить тесные корреляционные связи между K^* и R , между K^* и p_1, p_2, p_3, p_4 (табл. 8). Корреляция между K^* и p_6 практически отсутствует.

Таблица 8. Коэффициенты корреляции между величинами K^* и другими характеристиками водосборных бассейнов Балтийского моря

K^*	R	H	p_1	p_2	p_3	p_4	p_6
	0,86	-0,85	0,82	-0,77	0,83	-0,59	-0,05

Как следует из данных табл. 8, наиболее тесная связь установлена между коэффициентами антропогенного давления на водосборные бассейны (K^*) и их структурной организацией (R). При этом чем больше величина R , тем больше величина K^* . Эта связь описывается следующим регрессионным уравнением:

$$K^* = -3,54 + 16,53 R \quad (8)$$

$$n = 9; r = 0,86; r^2 = 0,73; \sigma_{y(x)} = 0,88; F_p = 19,07; F_T = 5,32; F_p/F_T = 3,58$$

Как и следовало ожидать, наибольший вклад в антропогенную нагрузку на водосборы оказывают доля распаханых земель (p_3), доля урбанизированных территорий (p_1) и доля территорий, занятых лесами (p_2).

В дополнение к изложенному была проведена математико-статистическая обработка данных экспедиционных исследований "Балтийского плавучего университета" в августе 2004 – 2005 гг. Задача заключалась в поиске количественных соотношений между концентрациями хлорофилла a и различными гидрохимическими и гидрофизическими показателями, а также в оценке распределения хлорофилла a в Балтийском море в августе 2004 г. и 2005 г. В результате анализа были выявлены количественные соотношения между концентрациями хлорофилла a и различными гидрохимическими и гидрофизическими показателями (соленость, щелочность, температура, процент насыщения воды кислородом, концентрация растворенного кислорода, рН, неорганический фосфор, кремний, нитраты и нитриты), полученными на основании натурных исследований (табл. 9).

Таблица 9. Соотношения между концентрациями хлорофилла *a* и различными переменными в Балтийском море в августе 2004 года

Параметры	Модель	<i>n</i>	<i>r</i> ²	<i>F_p</i>	<i>F_p/F_T</i>
Соленость, <i>S</i> , ‰	$[Chl\ a] = 8,94 - 1,03\ S$	44	0,74	119,5	29,4
Щелочность, <i>Alk</i>	$[Chl\ a] = 13,83 - 7,45\ Alk$	44	0,66	81,5	20,0
Кремний, <i>Si</i>	$[Chl\ a] = 5,40 - 0,01\ [Si]$	39	0,52	40,1	9,8

Для оценки качества вод Балтики в зависимости от содержания хлорофилла *a* была использована классификация, предложенная финскими специалистами и приведенная в работе (The state..., 2001) (табл. 10). На основе приведенной классификации была проведена оценка распределения качества вод Балтийского моря и отдельных его районов по результатам наблюдений в августе 2004 г. (табл. 11).

Таблица 10. Классификация качества вод Балтийского моря в зависимости от содержания хлорофилла *a*

Показатель	Качество вод				
	превосходное	хорошее	удовлетворит.	сносное	плохое
хлорофилл <i>a</i> , мг/м ³	<2	2-4	4-12	12-30	>30

Таблица 11. Распределение качества вод Балтийского моря в августе 2004г.,%

Район	Число наблюдений	Качество вод		
		превосходное	хорошее	удовлетворит.
Вся Балтика	84	42,7	21,3	36,0
Финский залив	40	0,0	31,1	68,9
Восточная часть Финского залива	33	0,0	27,3	72,7
Западная часть Финского залива	7	0,0	57,1	42,9
Центральная Балтика	14	64,3	28,6	7,1
Акватория вблизи острова Борнхольм	25	42,7	21,3	36,0
Калининградский полигон	5	80,0	20,0	0,0

Как следует из приведенных данных, качество вод восточной части Финского залива (Российские территориальные воды) в августе 2004 г. на 72,7% может быть охарактеризовано как удовлетворительное и на 27,3% - как хорошее. В ходе экспедиции 2005г. были определены концентрации хлорофилла *a* в поверхностных слоях воды различных районов Балтийского моря. Данные проведенных наблюдений представлены на рис. 4.

Полученные данные свидетельствуют об уменьшении концентраций хлорофилла *a* в направлении с востока на запад. Наибольшие концентрации хлорофилла *a* зафиксированы в восточной части Финского залива, что связано с

поступлением большого количества биогенных веществ (азота, фосфора) в Невскую губу со стоком реки Невы и ее рукавов.

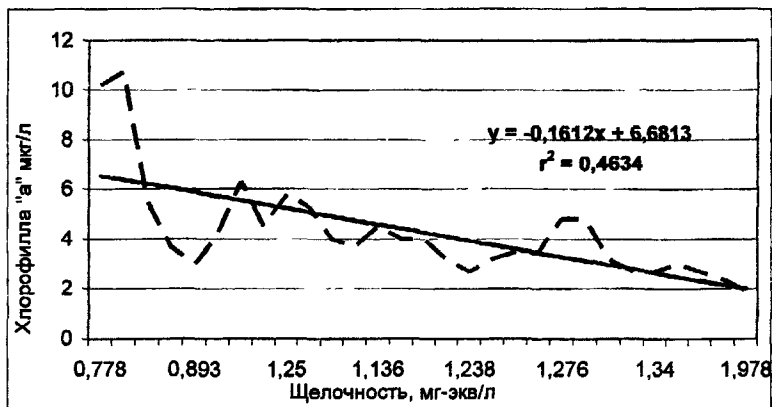


Рис. 4. Зависимость концентраций хлорофилла *a* от щелочности в Балтийском море в августе 2005 г.

В главе "Антропогенное давление на водосборы водохранилищ" приведены общие сведения о водохранилищах и выявлены количественные соотношения между антропогенным давлением на водосборы водохранилищ (K^*) и качеством их вод.

В качестве зависимых переменных были рассмотрены соотношение общего азота к общему фосфору ($N_{\text{Общ}} : P_{\text{Общ}}$), биомасса бентоса ($БМ$), первичная продукция (P_{PE}) и ихтиомасса открытых плесов ($ИМ$). В качестве независимых переменных были рассмотрены площадь водосбора (F), площадь водохранилища (f), средняя (H_{CP}) и максимальная ($H_{МАК}$) глубина водоема, длина береговой линии (L), время условного водообмена (τ), удельный водосбор ($\Delta F = F/f$), показатель Шиндлера ($Z = (F+f)/V$), показатель открытости (f/H_{CP}), коэффициент емкости ($H_{CP}/H_{МАК}$), индекс антропогенной нагрузки на водные ресурсы водосбора ($АНВР$), отношение длины береговой линии к объему водохранилища (L/V), коэффициент антропогенного давления (K^*).

Проведенный анализ показал, что среди различных административно-территориальных (плотность населения, коэффициент антропогенного давления), морфометрических (удельный водосбор, показатель Шиндлера, показатель открытости, показатель однородности рельефа дна и др.) и гидрографических (условное время водообмена, отношение средней глубины к условному времени водообмена) показателей наиболее значимым (наиболее информативным) показателем является коэффициент антропогенного давления на водосборный бассейн (табл. 12 и рис. 5).

Таблица 12. Количественные соотношения между величинами K^* и гидрохимическими и гидробиологическими показателями водохранилищ

Показатель	Уравнение регрессии	Статистические характеристики					
		n	r	r^2	$\sigma_{y(x)}$	F_P	F_T
<i>Нобш Ровш</i>	$\lg(N_{обш} : P_{овш}) = 1,27 - 1,62 \lg K^*$	14	0,90	0,81	0,17	48,7	10,4
<i>Биомасса бентоса (БМ)</i>	$\lg(BM) = 0,73 + 0,40 \lg K^*$	19	0,80	0,64	0,23	29,7	6,7
<i>Первичная продукция (РРФ)</i>	$\lg(P_{РФ}) = 3,29 + 0,87 \lg K^*$	7	0,91	0,83	0,09	24,0	5,9
<i>Ихтиомасса открытых плесов (ИМ)</i>	$\lg(ИМ) = 1,93 + 0,40 \lg K^*$	7	0,84	0,71	0,18	12,1	5,99

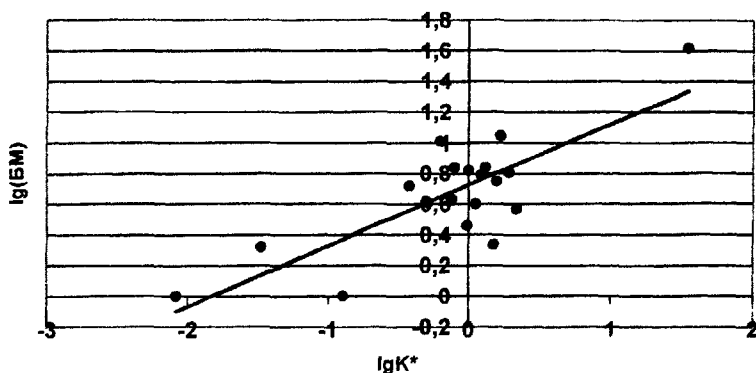


Рис. 5. Зависимость биомассы бентоса в крупных водохранилищах от коэффициента антропогенного давления на их водосборные бассейны

В главе "Антропогенное давление на водосборы озер" рассмотрены основные проблемы лимнологии (эвтрофирование, токсификация, ацидофикация, заиливание, флуктуации уровня и разрушение озерных экосистем). На основе данных литературы был проведен анализ поступления общего фосфора и общего азота с единицы территории различных водосборных бассейнов ($T-P/F$ и $T-N/F$ соответственно, т/год). Результаты анализа показали наличие тесных и статистически значимых регрессионных связей между $T-P/F$ и $T-N/F$ и коэффициентами антропогенного давления на водосборные бассейны (K^*) (табл. 13 и 14).

Полученный результат позволил оценить природную составляющую поступления общего фосфора и общего азота с единицы водосборного бассейна. Действительно, если $K^* = 0$ (отсутствие антропогенного давления на водосборный бассейн), то свободные члены в приведенных уравнениях характеризуют только природное (фоновое) поступление рассматриваемых биогенных элементов с единицы водосборной территории (1 км^2). Так, для озер

Японии фоновое поступление составляет 0,070 т/год, для озер Европы – 0,010 т/год, для озер Азии – 0,055 т/год.

Таблица 13. Уравнения регрессии, связывающие коэффициенты антропогенного давления (K^*) и поступление общего фосфора с единицы площади водосбора ($T-P/F$) на различных территориях

Наименование территории	Уравнение регрессии	Статистические характеристики					
		n	r	r^2	$\sigma_{y(x)}$	F_P	F_T
Япония	$T-P/F=0,07+0,008K^*$	14	0,87	0,76	0,10	37,2	4,7
Швеция, Финляндия, Швейцария, Италия, Франция	$T-P/F=0,006+0,009K^*$	8	0,95	0,91	0,007	61,2	5,6
США и Канада	$T-P/F=0,009+0,029K^*$	24	0,87	0,75	0,02	66,3	4,3
Европа	$T-P/F=0,010+0,012K^*$	20	0,81	0,66	0,02	34,3	4,4
Азия	$T-P/F=0,055+0,009K^*$	20	0,82	0,67	0,14	37,0	4,4

Таблица 14. Уравнения регрессии, связывающие коэффициенты антропогенного давления (K^*) и поступление общего азота с единицы площади водосбора ($T-N/F$) на различных территориях

Наименование территории	Уравнение регрессии	Статистические характеристики					
		n	r	r^2	$\sigma_{y(x)}$	F_P	F_T
Япония	$T-N/F=0,93+0,07K^*$	12	0,95	0,90	0,50	90,3	4,8
США и Канада	$T-N/F=0,01+0,50K^*$	13	0,94	0,88	0,34	80,1	4,8
Азия	$T-N/F=0,84+0,07K^*$	20	0,90	0,82	0,67	81,2	4,4

Как следует из данных, приведенных в табл. 14., тесная корреляционная связь между поступлением в озера общего азота с единицы водосборной территории и коэффициентами антропогенного давления была установлена для озер Японии, США и Канады и Азии. Для этих территорий способом, аналогичным приведенному выше, были рассчитаны величины фонового поступления общего азота с единицы водосборной территории (свободные члены в уравнениях регрессии). Для озер Японии эта величина составила 0,930 т/год, для озер США и Канады – 0,010 т/год, а для рассмотренных озер Азии – 0,840 т/год.

В этой же главе приведены результаты поиска количественных соотношений между антропогенным давлением на водосборные бассейны озер, расположенных в различных частях Земного шара, и качеством их вод, характеризуемым гидрофизическими (прозрачность), гидрохимическими (содержание биогенных элементов) и биохимическими (содержание хлорофилла a) показателями. Наряду с этим, были выявлены связи между вышеперечисленными показателями состава и свойств озерных вод и морфометрическими и гидрографическими характеристиками озер. Как следует из данных, приведенных в табл. 15. и рис.6, наиболее тесные корреляционные

связи установлены для озер Азии, Океании, Африки и Южной Америки ($r = 0,88$), менее тесной оказалась связь между содержанием хлорофилла a и коэффициентами K^* для озер Европы ($r = 0,74$). При совместном рассмотрении 50 озер мира (кроме озер Северной Америки) значение коэффициента корреляции было достаточно высоким и равнялось $0,85$.

Таблица 15. Уравнения регрессии, связывающие коэффициенты антропогенного давления ($lg(K^*)$) и концентрацию хлорофилла a ($lg([Chl a])$) на различных территориях

Наименование территории	Уравнение регрессии	Статистические характеристики					
		n	r	r ²	$\sigma_{y(x)}$	F _p	F _T
Европа	$lg([Chl a]) = 0,55 + 0,48 lg(K^*)$	18	0,74	0,55	0,36	19,5	4,5
Азия, Океания, Африка и Ю. Америка*	$lg([Chl a]) = 0,60 + 0,70 lg(K^*)$	32	0,88	0,77	0,36	102,5	4,2
Весь мир (за исключением С. Америки)	$lg([Chl a]) = 0,59 + 0,64 lg(K^*)$	50	0,85	0,72	0,37	121,2	4,0

* Азия – 26 озер; Океания – 2 озера; Ю. Америка – 2 озера; Африка – 2 озера.

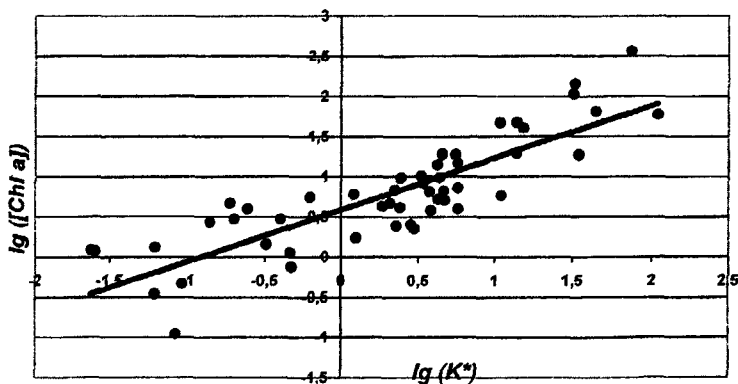


Рис. 6. Зависимость концентрации хлорофилла a ($lg([Chl a])$) от коэффициента антропогенного давления на водосборы озер мира (кроме стран Северной Америки) ($lg(K^*)$)

Выявленное нами количественное соотношение между коэффициентами антропогенного давления на водосборы озер Европы и содержанием в них хлорофилла a (табл. 15.) позволило рассчитать значения коэффициентов антропогенного давления (K^*) и плотности населения ($ПН^*$), соответствующие различным трофическим уровням озер (табл. 16). Для расчетов было проведено преобразование уравнения, приведенного в табл. 15, относительно $ПН^*$:

$$ПН^* = 1,56 [Chl a]^{2,22} \quad (9)$$

Таблица 16. Прогнозируемые величины коэффициентов антропогенного давления и плотности населения, соответствующие типам трофического состояния озер Европы

Тип водоема по уровню трофии	Среднее содержание хлорофилла <i>a</i> , мкг/л	Прогнозируемые величины	
		K^*	$ПН$, чел/км ²
Ультраолиготрофный	≤ 1	≤ 0,07	≤ 1,6
Олиготрофный	≤ 2,5	≤ 0,49	≤ 12
Мезотрофный	2,5 - 8	0,49 - 5,4	12 - 158
Эвтрофный	8 - 25	5,4 - 56	158 - 1979
Гипертрофный	≥ 25	≥ 56	≥ 1979

Выводы

1. Создана база данных, содержащая сведения о морфометрических, гидрографических, административно-территориальных, гидрохимических и гидробиологических характеристиках водных объектов и их водосборных бассейнов.
2. Коэффициенты антропогенного давления – интегральные показатели антропогенного воздействия на различные территории (стран, городов, водосборных бассейнов). Для развитых стран коэффициенты антропогенного давления (K^*) представляют собой степенную функцию нормированной плотности населения ($ПН/41,6$) вида $K^* = 1,55(ПН/41,6)^{0,93}$, где 41,6 - среднемировая плотность населения, человек/км².
3. Для анализа водосборных бассейнов возможно использование двух подходов. Первый базируется на оценке коэффициентов антропогенного давления, второй – на оценке информационной энтропии конечного ансамбля событий Шеннона и учитывает долю урбанизированных территорий, лесов, распаханых земель, водных объектов, болот и увлажненных земель.
4. Коэффициенты антропогенного давления на водосборы связаны значимой степенной зависимостью с гидрохимическими, гидробиологическими и биохимическими показателями состава и свойств вод различных водных объектов (озер, водохранилищ).
5. Коэффициенты антропогенного давления имеют линейную и статистически значимую связь с поступлением биогенных элементов в озеро, водохранилища и Балтийское море с единицы территории водосбора. Выявленная закономерность является основой для отдельной оценки природной (при $K^* = 0$) и антропогенной составляющих биогенного стока.
6. Ни на один из суббассейнов Балтийского моря (Центральная Балтика, Финский залив, Рижский залив, Ботническое море, Ботнический залив, Западная Балтика, пролив Каттегат) Россия не оказывает наибольшего антропогенного давления по сравнению с другими странами.

Основные публикации по теме диссертации

1. Фрумин Г.Т., Рянжин С.В., Образцова А.Б. Антропогенная нагрузка на водосборы Балтийского моря.// 5-й Международный Экологический Форум "День Балтийского моря". Сборник тезисов. СПб, 2004. С. 174-175.
2. Frumin G.T., Ryanzhin S.V., Obratsova A.B. Anthropogenic pressure on watershed basins of the Baltic Sea.// 5-th International Environmental Forum "Baltic Sea Day". The theses. Saint-Petersburg, 2004. P.128-129.
3. Образцова А.Б., Фрумин Г.Т., Рянжин С.В. Антропогенные нагрузки на водосборы Балтийского моря.// 7-я международная конференция и выставка. Материалы конференции. СПб, 2004. С.227-230.
4. Фрумин Г.Т., Образцова А.Б., Рянжин С.В. Антропогенное давление на суббассейны Балтийского моря.// СПб, Экологическая химия №13(4), 2004. С.270-278.
5. Образцова А.Б., Рянжин С.В., Фрумин Г.Т. Коэффициенты антропогенного давления на территории стран мира и плотность населения.// Материалы итоговой сессии ученого совета. СПб, РГГМУ, 2005. С.197-198.
6. Образцова А.Б., Фрумин Г.Т. Новый подход к анализу водосборных бассейнов (на примере стран Балтийского моря).// Материалы итоговой сессии ученого совета. СПб, РГГМУ, 2005. С.198-199.
7. Фрумин Г.Т., Максимов А.А., Максимова О.Б., Образцова А.Б. Распределение хлорофилла *a* в августе 2004 года.// 6-й Международный Экологический Форум "День Балтийского моря". Сборник тезисов. СПб, 2005. С. 114.
8. Frumin G., Maximov A., Maximova O. & Obratsova A. Distribution of chlorophyll *a* in the Baltic Sea in August 2004.// 6-th International Environmental Forum "Baltic Sea Day". The theses. Saint-Petersburg, 2005. P.115.
9. Образцова А.Б., Фрумин Г.Т. Антропогенное давление на территории крупных городов России.// 3-я международная научная конференция "Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон". СПб, РГГМУ, 2005. С.47.
10. Фрумин Г.Т., Рянжин С.В., Образцова А.Б. Коэффициенты антропогенного давления на территории стран мира и плотность населения.// "Проблемы теоретической и прикладной экологии". Сборник научных трудов. СПб, РГГМУ, 2005. С.66-67.

Формат 60*84/16 Печать офсетная.
Тираж 70 Заказ 336

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в типографии ООО "СВ-Центр"
195009, г Санкт-Петербург, ул Комсомола 41.

№ 23745

РНБ Русский фонд

2006-4

24958