

На правах рукописи

СТЕПАНОВА ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ УРОВНЕЙ
ЭКСПОРТА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ТЕРРИТОРИЙ СТРАН
БАСЕЙНА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Специальность 25.00.36 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург
2009

Работа выполнена на кафедре прикладной экологии Российского государственного гидрометеорологического университета

Научный руководитель:

доктор химических наук, профессор

Фрумин Григорий Тевелевич

Официальные оппоненты:

доктор географических наук, профессор

Смирнов Николай Павлович

доктор биологических наук, профессор

Тарбаева Вероника Михайловна

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет

Защита состоится «___» _____ 20__ г. в ___ часов ___ 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 «___» _____ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Бескид П. П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационного исследования. 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, что наряду с природными особенностями Балтийского моря является причиной его повышенной чувствительности к антропогенному воздействию.

Анализ состояния морской среды Балтийского моря в течение нескольких последних десятилетий привел экспертов Хельсинкской Комиссии по защите морской среды Балтийского моря (ХЕЛКОМ) к выводу о том, что основные негативные изменения в море связаны с процессом эвтрофирования.

15 ноября 2007 г. в г. Краков странами-членами ХЕЛКОМ – Финляндией, Швецией, Данией, Россией, Германией, Польшей, Латвией, Литвой и Эстонией, – был принят План действий по Балтийскому морю (ПДБМ), который является долгосрочным стратегическим документом, направленным на сокращение загрязнения морской среды и восстановление благополучного экологического состояния Балтийского моря к 2021 г. ПДБМ предусматривает снижение поступления соединений азота и фосфора в Балтийское море к 2016 г. на 135000 т и 15250 т соответственно. В 2010 г. страны-члены ХЕЛКОМ должны представить национальные программы по реализации достигнутых соглашений, оценка эффективности которых будет проведена в 2013 г. Предполагается введение экономических санкций за невыполнение принятых странами обязательств.

Актуальность настоящего диссертационного исследования обусловлена необходимостью выполнения Российской Федерацией международного соглашения по снижению биогенной нагрузки на Балтийское море.

Цель диссертационного исследования заключалась в геоэкологическом обосновании предельных уровней экспорта биогенных элементов с территорий стран ХЕЛКОМ в Балтийское море.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Собрать, обобщить и проанализировать данные литературы о современном геоэкологическом состоянии Балтийского моря и его водосборного бассейна.
2. Проанализировать основные причины и современные масштабы эвтрофирования Балтийского моря.
3. Выявить основные геоэкологические факторы, влияющие на поступление биогенных элементов в Балтийское море с территории водосборного бассейна.
4. Оценить относительную значимость выявленных факторов в их совокупном влиянии на формирование биогенного стока в Балтийское море.
5. Предложить метод обоснования предельно допустимых концентраций общего азота и валового фосфора для крупнейших рек бассейна Балтийского моря.

6. Разработать методы дифференцированной оценки фоновой (природной) и антропогенной составляющих биогенного стока с водами контролируемых рек бассейна Балтийского моря.

7. Предложить метод оценки фоновой составляющей биогенного стока с водами неконтролируемых рек бассейна Балтийского моря.

Материалы и методы исследования. В диссертационном исследовании были использованы данные ХЕЛКОМ и Северо-Западного Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗ УГМС). В качестве методов исследования использовались современные средства математико-статистической обработки данных.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Принципы оценки предельных уровней экспорта биогенных элементов с территориями стран ХЕЛКОМ в Балтийское море.

2. Методы дифференцированной оценки фоновой и антропогенной составляющих биогенного стока с водами контролируемых рек бассейна Балтийского моря.

3. Метод оценки фоновой составляющей стока валового фосфора с водами неконтролируемых рек бассейна Балтийского моря.

Научная новизна работы:

1. Впервые сформулированы принципы оценки предельных уровней экспорта биогенных элементов в Балтийское море с территориями стран ХЕЛКОМ, позволяющие учесть неоднородность Балтийского бассейна.

2. Разработан метод оценки максимально допустимого биогенного стока с территориями стран бассейна Балтийского моря с учетом фоновой составляющей стока.

3. Впервые на основании величин допустимых нагрузок на субэкватории Балтийского моря оценены предельно допустимые концентрации валового фосфора и общего азота для крупнейших рек бассейна с учетом площадей их водосборных бассейнов и средних многолетних расходов воды.

4. Разработан метод расчета фоновой составляющей стока валового фосфора с водами неконтролируемых рек бассейна Балтийского моря.

Практическая значимость работы. Результаты работы позволяют выработать рекомендации по корректному распределению уровней биогенной нагрузки на Балтийское море и его субэкватории с территориями стран Балтийского бассейна.

Достоверность научных положений и выводов обусловлена критическим анализом большого количества литературных источников и применением современных методов математико-статистической обработки данных.

Личный вклад автора заключается в постановке проблемы, методическом обеспечении ее решения и анализе полученных результатов.

Апробация работы. Результаты исследования докладывались и обсуждались: на итоговых сессиях Ученого совета РГГМУ (Санкт-Петербург, 22 января 2008 г., 27 января 2009 г.), на IX и X международных экологических форумах «День Балтийского моря» (Санкт-Петербург, 11-13 марта 2008 г., 17-19 марта 2009 г.), на ежегодной межвузовской научно-методической конференции LXI Герценовские чтения «География и смежные науки» (Санкт-

Петербург, 24-25 апреля 2008 г.), на региональной молодежной конференции «Современные экологические проблемы и их решение: взгляд молодежи» (Санкт-Петербург, 21 октября 2008 г.), на международной конференции «Гармонизация водосборов рек и эстуариев» (Шанхай, 26-30 октября 2008 г.), на всероссийской конференции с международным участием «Водные и наземные экосистемы. Проблемы и перспективы исследования» (Вологда, 24-28 ноября 2008 г.), на международной научно-практической конференции «Географическое образование и наука в России: история и современное состояние» (Санкт-Петербург, 3-4 декабря 2008 г.), на VII международном семинаре «Геология, геоэкология и эволюционная география» (Санкт-Петербург, 19-20 декабря 2008 г.), на заседании рабочей группы по мониторингу, оценке и прикладным исследованиям Совместной Российско-Эстонской комиссии по охране и использованию трансграничных вод (Псков, 16 июня 2009 г.), на V международной конференции «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон» (Санкт-Петербург, 7-9 июля 2009 г.), на международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие и геоэкологические проблемы Балтийского региона» (Великий Новгород, 23-25 октября 2009 г.).

Публикации. Материалы изложены в 16 публикациях, в том числе в журналах «Вестник Санкт-Петербургского университета» (1) и «Молодой ученый» (2), рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, изложена на 223 страницах, включает 83 таблицы, 51 рисунок. Список использованных источников включает 200 наименований, в том числе 85 иностранных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы; определены цель и задачи исследования; показана научная новизна и практическая значимость исследований.

В первой главе представлена характеристика современного геоэкологического состояния Балтийского моря и его водосборного бассейна.

Для каждого моря свойственна своя специфика комплекса природных характеристик, обуславливающая структуру и функционирование экосистемы моря, что отражается на химическом балансе вещества в море и трофике водоема, в связи с чем в первой главе рассматриваются физико-географические, гидролого-климатические и гидрохимические особенности Балтийского моря. Показано, что важнейшие абиотические параметры, наряду с морфометрией определяющие особенности экосистемы Балтийского моря, – это соленость, температура и концентрация кислорода.

Специфика гидрохимического режима Балтийского моря обусловлена уникальным комплексом факторов, определяющих поступление, распространение и трансформацию вещества в море. Важнейшие из них – ограниченный водообмен с Северным морем и мощный материковый сток, формирующий устойчивую стратификацию водных масс с затрудненным вертикальным обменом

между слоями, а также сложная геоморфологическая структура моря. Специфические физико-географические особенности моря приводят к тому, что существенное значение во многих проявлениях эвтрофирования могут иметь чисто природные процессы и факторы.

Внутриматериковое положение Балтийского моря (рис. 1), его незначительный объем и мелководность проливов определяют важную роль речного стока в формировании режима моря, в связи с чем в первой главе дается характеристика речного стока в Балтийское море. Приводятся данные о распределении водосборов крупнейших рек между территориями стран бассейна Балтийского моря, а также величины средних многолетних расходов воды в водотоках. Рассматриваются внутригодовая и межгодовая изменчивость речного стока.



Рис. 1. Карта-схема Балтийского моря и его водосборного бассейна

Эффективность природоохранных мероприятий возрастает многократно, если они осуществляются не локально и эпизодически, а подготавливаются и проводятся с учетом закономерностей функционирования крупных экологических систем – геосистем. С этой точки зрения, безусловно, наименьшей структурной геосистемной единицей следует считать водосборный бассейн Балтийского моря (рис.1), в связи с чем в первой главе даются физико-географическая, социально-административная и хозяйственно-экономическая характеристики водосборного бассейна Балтийского моря. Показано, что значительная протяженность водосбора с юга на север определяет большое разнообразие в физико-географических условиях; характер землепользования на территории бассейна в значительной степени зависит от коренных пород и типа почвы.

Приводится распределение частных водосборных бассейнов Балтийского моря по странам и субакваториям; дана количественная оценка заселенности, урбанизированности, распаханности, заболоченности, облесенности и озерности суббассейнов. Охарактеризованы крупнейшие водотоки рассматриваемых суббассейнов.

Во второй главе анализируются основные причины и современные масштабы эвтрофирования Балтийского моря.

Основные признаки эвтрофирования в Балтийском море были выявлены раньше, чем на других морских акваториях. Быстрому эвтрофированию Балтийского моря способствует ряд причин, важнейшими являются следующие две. Во-первых, это сравнительно небольшое море, окруженное экономически высокоразвитыми странами; водосбор Балтийского моря почти в 4 раза превышает площадь самого моря. Годовой объем речного стока составляет свыше 2 % объема всего моря. Несмотря на принимаемые водоохранные меры, в Балтийское море поступает значительное количество органических загрязнений и биогенных элементов. Вторая причина заключается в полузамкнутости этого водоема: замедленный водообмен приводит к тому, что органические вещества, как аллохтонные, так и автохтонные, и питательные соли накапливаются в преобладающем большинстве в самом море.

Рассмотрены особенности биогеохимических циклов и сезонной динамики соединений азота и фосфора в Балтийском море, – элементов, лимитирующих первичную продукцию.

Биогенные элементы, поступающие в Балтийское море, могут иметь как природное, так и антропогенное происхождение. Во второй главе охарактеризованы важнейшие источники поступления биогенных элементов.

Суммарная доля в поступлении азота и фосфора от разных стран на акваторию Балтийского моря значительно варьирует в зависимости от размеров водосборного бассейна, количества жителей, интенсивности сельского хозяйства, качества очистки сточных вод и других причин – от 3 % (Германия) до 27 % (Польша) по азоту и от 2 % (Германия) до 34 % (Польша) по фосфору. В целом на водосборе Балтийского моря основная роль в поступлении соединений азота принадлежит диффузным источникам – до 71 % общей нагрузки; максимальная нагрузка по фосфору исходит от точечных источников (56 %), из них 90 % связано с поступлением от городов.

Анализ баланса биогенных соединений в водоеме позволяет оценить сбалансированность системы, направленность миграционных процессов и генезис химических соединений в водоеме, в связи с чем во второй главе рассматривается биогенный баланс Балтийского моря. Эволюция баланса биогенных элементов Балтийского моря за период с 1960 г. по настоящее время происходила в основном за счет неуклонного роста показателей поступления биогенных элементов с материковым стоком; прочие статьи баланса изменялись незначительно. Основной статьей приходной части баланса биогенных элементов (свыше 60 %) являются реки, что типично для моря, расположенного в гумидной зоне и имеющего затрудненный водообмен с океаном. Значительно поступление со сточными водами – 8 % для азота и 20 % для фосфора. Основная часть годичного поступления биогенных элементов остается в Балтийском море

(около 70 % и 80 % суммарного азота и фосфора соответственно), что также типично для моря с затрудненным водообменом.

Проанализировано влияние развития процесса эвтрофирования на экосистему Балтийского моря. К основным проявлениям эвтрофирования в Балтийском море относят: увеличение концентрации азота и фосфора в воде и донных отложениях, увеличение биомассы и продукции пелагических и донных растений, увеличение мутности и уменьшение прозрачности воды вследствие большого количества сестона, повышение содержания растворенного кислорода в поверхностных и его понижение в глубинных водах вплоть до полного исчезновения и появления сероводорода, массовую гибель организмов в бескислородных условиях, изменение видового состава биологических сообществ.

В многолетнем масштабе ведущей причиной эвтрофикации Балтийского моря является возрастание антропогенной нагрузки органического вещества и биогенных элементов, тогда как изменениями природных факторов определяются лишь фоновые межгодовые колебания, усиливающие или ослабляющие антропогенное воздействие.

Третья глава посвящена обоснованию теоретических основ нормирования уровней экспорта азота и фосфора в Балтийское море с территорий стран ХЕЛКОМ.

В ПДБМ¹ установлены величины требуемых снижений поступлений азота и фосфора с территорий стран ХЕЛКОМ. Необходимо подчеркнуть, что при расчете этих величин не были учтены физико-географические, социально-административные и хозяйственно-экономические особенности водосборных суббассейнов Балтийского моря, относящихся к разным странам, а также величины фоновых составляющих биогенного экспорта. Это привело к необоснованному завышению уровней требуемого снижения поступлений биогенных элементов (БЭ) для ряда стран, характеризующихся наиболее низкими величинами антропогенной составляющей биогенного экспорта, приходящимися на душу населения (рис. 2).

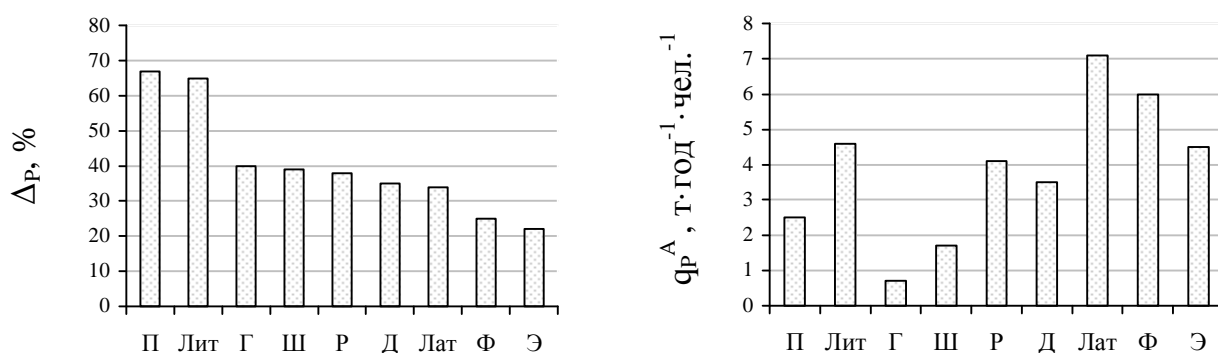


Рис. 2. Величины требуемых снижений поступления фосфора (ΔP), установленных в ПДБМ (а); величины антропогенной составляющей экспорта фосфора (qP^A) на душу населения (б) (П-Польша, Лит-Литва, Г-Германия, Ш-Швеция, Р-Россия, Д-Дания, Лат-Латвия, Ф-Финляндия, Э-Эстония)

¹ HELCOM Baltic Sea Action Plan // HELCOM Ministerial Meeting. Krakow, Poland, 15 November 2007b. 101 p.

При этом если для Швеции и Германии, фоновые составляющие экспорта фосфора с территорий которых составляют 56 % и 51 %² соответственно, предусмотрено его снижение на 39 % и 40 %, что означает необходимость практически полного сокращения антропогенной составляющей экспорта фосфора, для ряда стран с невысокими величинами фоновой составляющей экспорта фосфора – Дании, Латвии, Эстонии, – допускается сохранить на прежнем уровне не менее 50 % антропогенного поступления фосфора. Таким образом, необходимость разработки принципов нормирования биогенной нагрузки на Балтийское море, которые позволили бы учитывать как неоднородность водосборного бассейна, так и величины фоновых поступлений биогенных элементов с территории водосбора, представляется очевидной.

Нами было показано, что предложенный экспертами ХЕЛКОМ подход³ к решению проблемы, согласно которому основной акцент ставится на определении требуемых уровней снижения поступления БЭ с территорий стран бассейна Балтийского моря пропорционально некоторому выбранному параметру x , характеризующему страны Балтийского бассейна (прямая 2, рис. 3а), содержит внутреннюю логическую ошибку. Так, в случае, если величина фактического экспорта БЭ $Q^{\text{ФАКТ.}}$ (точка А, рис. 3а) меньше значения $Q^{\text{ТЕОР.}}$, определяемого линией тренда, описывающей зависимость экспорта БЭ от параметра x (прямая 1, рис. 3а), величина вычисленного требуемого сокращения ΔQ оказывается завышенной на величину $(Q^{\text{ТЕОР.}} - Q^{\text{ФАКТ.}})$. Напротив, если величина фактического экспорта больше значения, определяемого линией тренда, величина требуемого сокращения необоснованно занижается.

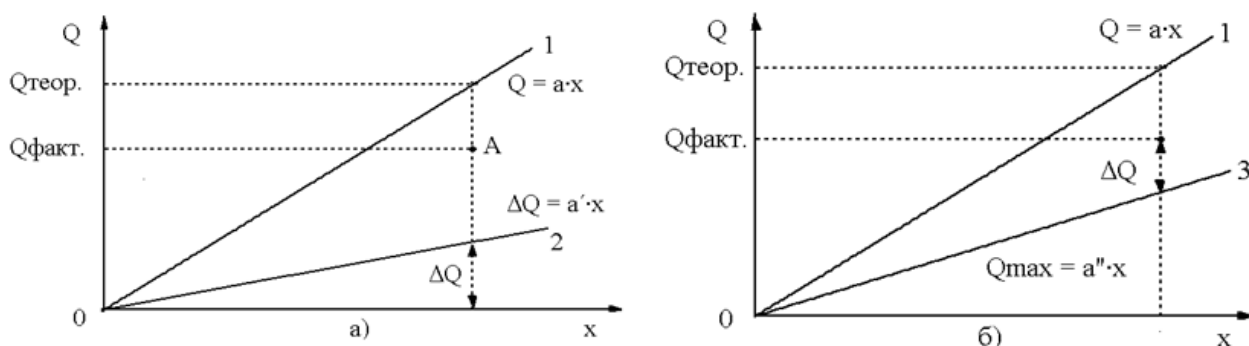


Рис. 3. Схема расчета величины требуемого снижения поступления БЭ (а); схема расчета предельного уровня экспорта БЭ (б)

Для получения более адекватных результатов нами было предложено перейти от расчетов величин требуемых сокращений биогенного экспорта к расчету величин максимально допустимых поступлений БЭ с территорий стран ХЕЛКОМ (прямая 3, рис. 3б). В рамках такого подхода для каждой страны региона, исходя из определенных параметров, характеризующих водосбор Балтийского моря на территории этой страны, следует установить предельные уровни экспорта БЭ на акваторию Балтийского моря.

² HELCOM, 2004. The fourth Baltic Sea pollution load compilation (PLC-4) // Baltic Sea Environ. Proc. No. 93. 189 p.

³ HELCOM BSAP EUTRO EXP/2007 // Expert Meeting for the Eutrophication Segment under the HELCOM Baltic Sea Action Plan. – Helsinki, Finland, 27-28 August 2007. 33 p.

Из рис. 3б видно, что при вычислении предельных уровней экспорта БЭ Q^{\max} на основании выбранного параметра x требуемое понижение нагрузки ΔQ определяется относительно величины фактически наблюдаемого поступления $Q^{\text{ФАКТ.}}$; в этом случае при $Q^{\text{ФАКТ.}} < Q^{\text{ТЕОР.}}$ величина требуемого сокращения обоснованно снижается на величину $(Q^{\text{ТЕОР.}} - Q^{\text{ФАКТ.}})$.

В рамках предложенного нами подхода для стран, характеризующихся в силу проводимой ими эффективной природоохранной политики низкими величинами антропогенной составляющей экспорта БЭ на акваторию Балтийского моря, относительные уровни сокращения биогенной нагрузки будут минимальными.

Для сокращения экспорта азота и фосфора в Балтийское море с территории водосборного бассейна в качестве приоритетных мер можно выделить следующие: введение более жестких требований по доочистке сточных вод; запрет на использование моющих средств, содержащих полифосфаты; проведение жесткой политики ведения сельского хозяйства, в частности, касающейся использования удобрений, животноводческих кормов, обращения с отходами ферм, вспашки, основанной на современных технологиях, преобразования пахотных земель в луга и т.д.

Проблема распределения предельных уровней экспорта БЭ между странами ХЕЛКОМ решалась нами в несколько этапов, включающих последовательную оценку влияния различных характеристик водосборных территорий на поступление с них БЭ в Балтийское море.

В качестве основных параметров оценки нами были выбраны площади стран, приходящиеся на водосбор Балтийского моря, численность проживающего на этих территориях населения, а также площади сельскохозяйственных угодий, урбанизированных территорий и территорий, занимаемых лесами и озерами. В связи с тем, что рассматриваемые нами параметры имеют разные размерности и могут в значительной степени различаться по абсолютному значению, что затрудняет их сопоставление и совместную оценку, мы использовали их относительные величины, определяемые как отношение абсолютного значения вводимого параметра для выбранной страны к сумме абсолютных значений этих параметров для всех стран на территории водосбора Балтийского моря.

Показано, что распределение предельных уровней экспорта БЭ на основании одного выбранного параметра некорректно, поскольку в рамках однопараметрического подхода выявить единую зависимость, удовлетворительно описывающую экспорт БЭ с территорий всех стран бассейна Балтийского моря, оказалось невозможным; в этом случае необходимо выполнять дифференциацию стран на группы по характеру зависимости экспорта БЭ от выбранного параметра. Показано также, что некоторые страны с одинаковой степенью обоснованности могут быть отнесены к разным группам, таким образом, дифференциация стран на группы носит в известной мере произвольный характер.

Невозможность одновременного учета влияния на поступление БЭ антропогенных и природных факторов при таком подходе может послужить предметом разногласий договаривающихся сторон.

Мы полагаем также нерациональным проведение распределения допустимых уровней поступления БЭ с территориями стран ХЕЛКОМ на основании вычисления среднего значения полученных согласно нескольким методам результатов, поскольку не все факторы оказывают сравнимое по значению и направленности влияние на экспорт БЭ в Балтийское море с территории его водосборного бассейна.

Нами было предложено определять предельные уровни экспорта БЭ на основании не менее чем двух наиболее информативных параметров, влияющих на величину биогенного экспорта, один из которых должен характеризовать антропогенную деятельность на водосборе.

Для расчета предельных уровней экспорта БЭ от i -той страны на основе выбранных параметров x и y использовалась следующая схема (именуемая далее методом линейной зависимости, МЛЗ):

1. Полученное на основании фактических данных² уравнение линейной зависимости, связывающее величины поступления биогенного элемента $Q(\text{БЭ})$ с территориями стран Балтийского бассейна и выбранные параметры x и y , характеризующие эти страны, приводилось к виду:

$$Q(\text{БЭ}) = a \cdot (x + c/a \cdot y + b/a) \quad (1)$$

2. Расчет величин максимально допустимого поступления биогенного элемента с территории i -той страны $Q(\text{БЭ})_i^{\max}$ осуществлялся пропорционально сомножителю $(x + c/a \cdot y + b/a)$ в уравнении (1):

$$Q(\text{БЭ})_i^{\max} = a' \cdot (x_i + c/a \cdot y_i + b/a), \quad (2)$$

где a' – коэффициент пропорциональности, определяемый из условия:

$$\sum_{i=1}^N Q(\text{БЭ})_i^{\max} = Q(\text{БЭ})^{\max}, \quad (3)$$

где $Q(\text{БЭ})^{\max}$ – максимально допустимое поступление БЭ¹ в Балтийское море, N – количество стран.

В общем виде a' определяется по уравнению:

$$a' = Q(\text{БЭ})^{\max} / \left(\sum_{i=1}^N x_i + c/a \sum_{i=1}^N y_i + N \cdot b/a \right) \quad (4)$$

Проведенный регрессионный анализ показал, что величины поступления азота и фосфора с территорий стран ХЕЛКОМ можно аппроксимировать рядом двухпараметрических зависимостей, которые могут быть далее положены в основу расчета величин максимально допустимых поступлений этих БЭ. Для экспорта фосфора наиболее значимыми являются доля площади водосбора Балтийского моря, приходящаяся на территорию страны (β) и относительная заселенность территории (η):

$$Q_P = 10300 \cdot (1,00 \cdot \beta + 1,88 \cdot \eta + 0,0676) \quad (5)$$

При этом, как и следовало ожидать, значимость заселенности территории для формирования экспорта фосфора превосходит значимость вклада ее площади.

Предельные уровни экспорта фосфора с территориями стран ХЕЛКОМ определялись в соответствии с уравнением:

$$Q_{P_i}^{\max} = 6040 \cdot (1,00 \cdot \beta_i + 1,88 \cdot \eta_i + 0,0676) \quad (6)$$

На экспорт азота наибольшее влияние из рассмотренных нами факторов оказывают параметр β и относительная аграрность территории α , представляющая собой отношение площади сельхозугодий данной страны к общей площади сельскохозяйственных угодий на территории всех стран ХЕЛКОМ:

$$Q_N = 370000 \cdot (1,00 \cdot \beta + 0,55 \cdot \alpha + 0,052) \quad (7)$$

Предельные уровни экспорта азота с территориями стран ХЕЛКОМ определялись в соответствии с уравнением:

$$Q_{N_i}^{\max} = 298000 \cdot (1,00 \cdot \beta_i + 0,55 \cdot \alpha_i + 0,052) \quad (8)$$

В качестве альтернативного подхода к определению предельных уровней экспорта БЭ нами был разработан метод, именуемый далее методом учета отклонения фактического поступления БЭ от теоретического (МОФП), согласно которому на основании наиболее информативных параметров, оказывающих влияние на поступление БЭ, и фактических данных по поступлению БЭ с территориями стран ХЕЛКОМ устанавливается регрессионная зависимость, связывающая выбранные параметры с величинами экспорта БЭ.

На основании корреляционного уравнения вычисляется теоретическое (ожидаемое) поступление БЭ с территории страны. Разность между вычисленным теоретическим поступлением БЭ и его фактическим поступлением (Δ_i) может быть как положительной, так и отрицательной (фактическое поступление БЭ с территории страны соответственно превышает или отличается в меньшую сторону от рассчитанного теоретически).

Далее на основе корреляционного уравнения вводится уравнение для вычисления величин требуемого снижения поступления БЭ аналогично схеме МЛЗ, в соответствии с которым и рассчитываются величины $\Delta Q_i^{\text{ТЕОР}}$ (требуемое снижение поступления БЭ, вычисленное относительно теоретического, а не фактического поступления).

Расчет величины фактически требуемого снижения $\Delta Q_i^{\text{ФАКТ}}$ осуществляется суммированием величин отклонения фактического поступления азота или фосфора от теоретического (Δ_i) и $\Delta Q_i^{\text{ТЕОР}}$.

Показано, что методы МОФП и МЛЗ приводят к близким результатам.

Фоновые поступления для отдельно взятой страны следует воспринимать в качестве атрибутивного фактора ее физико-географических особенностей. Следовательно, фоновые поступления БЭ, будучи объективной реально-

стью, не могут быть подвергнуты квотированию. Фоновые поступления фосфора составляют² от 12 % (Дания) до 53 % (Германия), азота – от 11 % (Дания) до 57 % (Россия) общего экспорта БЭ с территории страны. Очевидно, что при такой неоднородности распределения величин фоновых поступлений предельные уровни экспорта БЭ должны устанавливаться только для антропогенных составляющих биогенной нагрузки, в связи с чем нами был разработан метод оценки предельных уровней экспорта, позволяющий учесть величины фоновых поступлений БЭ с территориями стран ХЕЛКОМ.

Расчет предельных уровней экспорта фосфора с учетом величин его фоновых поступлений осуществлялся на основе полученной зависимости антропогенной составляющей экспорта фосфора Q_P^A от выбранных параметров β и η :

$$Q_P^A = 1130 \cdot (1,00 \cdot \beta + 15,3 \cdot \eta + 0,510) \quad (9)$$

При переходе от рассмотрения суммарного экспорта фосфора (5) к рассмотрению его антропогенной составляющей вклад доли площади водосборной территории значительно уменьшается за счет увеличения значимости антропогенного фактора – заселенности – почти в восемь раз. Следовательно, роль параметра β в формировании экспорта фосфора с территорий стран Балтийского бассейна в существенной мере обусловлена величиной фоновых поступлений.

Исходя из того, что за вычетом фоновых поступлений антропогенное поступление фосфора требуется сократить до величины $10097 \text{ т} \cdot \text{год}^{-1}$, уравнение для расчета предельных уровней экспорта антропогенной составляющей поступления фосфора $Q_{P_i}^A \text{ max}$ имеет вид:

$$Q_{P_i}^A \text{ max} = 483 \cdot (1,00 \cdot \beta_i + 15,3 \cdot \eta_i + 0,510) \quad (10)$$

Расчет предельных уровней экспорта азота с учетом величин его фоновых поступлений осуществлялся на основе полученной зависимости антропогенной составляющей экспорта азота Q_N^A от выбранных параметров β и α :

$$Q_N^A = 122000 \cdot (1,00 \cdot \beta + 1,74 \cdot \alpha + 0,139) \quad (11)$$

При переходе от рассмотрения суммарного экспорта азота (7) к рассмотрению его антропогенной составляющей вклад аграрности водосборной территории возрастает более чем в три раза, что вполне объяснимо, так как сельское хозяйство является значимым источником поступления азота в водотоки и водоемы.

Исходя из того, что за вычетом фоновых поступлений антропогенное поступление азота требуется сократить до величины $342202 \text{ т} \cdot \text{год}^{-1}$, уравнение для расчета допустимых величин антропогенной составляющей поступления азота $Q_{N_i}^A \text{ max}$ имеет вид:

$$Q_{N_i}^A \text{ max} = 85700 \cdot (1,00 \cdot \beta_i + 1,74 \cdot \alpha_i + 0,139) \quad (12)$$

Необходимо подчеркнуть, что при определении величин предельных уровней поступления БЭ предложенным методом результаты в значительной степени определяются величинами заявленных² странами ХЕЛКОМ фоновых поступлений БЭ с их территорий. В связи с чем очевидна актуальность задачи по разработке методик оценки величин фоновых поступлений БЭ с территорий водосборов, некоторые подходы к решению которой рассмотрены в главе 4.

В ПДБМ¹ установлены величины требуемых снижений поступлений азота и фосфора с территорий стран ХЕЛКОМ, но не приведено распределение этих величин по суббассейнам с учетом зон основной ответственности сторон.

Для расчета предельных уровней экспорта БЭ на субакватории Балтийского моря на основании полученных зависимостей (9) и (11) мы ввели индексы нормирования экспорта БЭ:

$$Z_{ij} = \frac{(x_{ij} + c/a \cdot y_{ij} + b/a)}{\sum_{i=1}^N (x_{ij} + c/a \cdot y_{ij} + b/a)}, \quad (13)$$

где Z_{ij} – индекс предельного уровня экспорта БЭ для i -той страны j -того суббассейна; x_{ij} , y_{ij} – параметры, характеризующие страну; N – число стран на территории рассматриваемого суббассейна.

На основе предложенных индексов предельный уровень экспорта БЭ с территории i -той страны на j -тую субакваторию $Q(\text{БЭ})_{ij}^{\max}$ может быть вычислен по уравнению:

$$Q(\text{БЭ})_{ij}^{\max} = Q(\text{БЭ})_j^{\max} \cdot Z_{ij}, \quad (14)$$

где $Q(\text{БЭ})_j^{\max}$ – суммарное максимально допустимое поступление¹ БЭ на j -тую субакваторию.

Результаты расчета предельных уровней экспорта БЭ с территорий стран ХЕЛКОМ на субакватории, для которых ПДБМ¹ предусматривает сокращение экспорта БЭ, представлены в таблицах 1-2.

Таблица 1. Предельные уровни экспорта фосфора в Балтийское море, т·год⁻¹

Страна \ Субакватория	Финский залив	Рижский залив	Центральная Балтика
Финляндия	777	–	–
Россия	3305	114	390
Эстония	779	262	18
Латвия	–	1054	176
Литва	–	–	420
Польша	–	–	5016
Германия	–	–	168
Дания	–	–	51
Швеция	–	–	511

Таблица 2. Предельные уровни экспорта азота в Балтийское море, т·год⁻¹

Субакватория	Финский	Центральная	Датские	Каттегат
--------------	---------	-------------	---------	----------

Страна	залив	Балтика	проливы	
Финляндия	20500	–	–	–
Россия	72500	10584	–	–
Эстония	13680	1034	–	–
Латвия	–	10447	–	–
Литва	–	26599	–	–
Польша	–	143614	–	–
Германия	–	7038	11504	–
Дания	–	2257	11633	12995
Швеция	–	29541	7752	31265

Особого внимания заслуживает вопрос о регламентации содержания валового фосфора и общего азота в поверхностных водах суши. Существующие в РФ нормативы содержания отдельных соединений азота в воде не учитывают влияние этих соединений на процесс эвтрофирования, поскольку преследуют гигиенические и рыбохозяйственные цели. Содержание валового фосфора в воде до настоящего времени не регламентировано.

Для предупреждения процесса эвтрофирования целесообразно установить ПДК биогенных веществ в воде исходя из экологических позиций. Эти ПДК следует разрабатывать дифференцированно для различных водоемов и водотоков и для разных физико-географических регионов, что позволило бы учитывать специфику региональных условий.

Для оценки ПДК биогенных элементов для крупнейших рек бассейна Балтийского моря мы применили подход, в основу которого положен принцип, согласно которому модуль биогенного стока с водосборной территории любой из рек рассматриваемого i -го суббассейна не должен превышать установленной для данного региона величины максимально допустимого модуля стока M_i^{\max} на i -тую субакваторию Балтийского моря.

На основании максимально допустимых величин¹ биогенного стока в Балтийское море нами были определены максимально допустимые модули материкового стока валового фосфора и общего азота с территорий суббассейнов Балтийского моря (табл. 3).

Таблица 3. Максимально допустимые модули биогенного стока в Балтийское море

Суббассейн	M^{\max} , кг·км ⁻² ·год ⁻¹	
	Фосфор	Азот
Ботнический залив	9,94	198
Ботническое море	10,9	253
Финский залив	11,8	258
Центральная Балтика	13,6	470
Рижский залив	14,0	768
Датские проливы	51,5	1130
Каттегат	19,7	557

Для оценки предельно допустимых концентраций валового фосфора (ПДК_{Рвал}) и общего азота (ПДК_{Нобщ}) в реках бассейна Балтийского моря мы предлагаем использовать следующие граничные условия:

$$\text{ПДК}_{\text{Рвал}} \leq M_i^{\text{max}}(P_{\text{вал}}) \cdot F / 0,0315 \cdot R_{\text{СГ}} \quad (15)$$

$$\text{ПДК}_{\text{Нобщ}} \leq M_i^{\text{max}}(N_{\text{общ}}) \cdot F / 0,0315 \cdot R_{\text{СГ}}, \quad (16)$$

где $R_{\text{СГ}}$ – среднегодовой расход воды в реке, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, F – площадь водосбора, км^2 .

Результаты расчетов по (15) и (16) для крупнейших рек бассейна Балтийского моря приведены в таблице 4.

Таблица 4. Предельно допустимые концентрации биогенных элементов для крупнейших рек бассейна Балтийского моря

Река	ПДК _{Рвал} , $\text{мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$	ПДК _{Нобщ} , $\text{мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$
Нева	41	890
Висла	78	2700
Даугава	62	3400
Неман	64	2200
Гёта-Эльв	55	1600
Кемийоки	29	580
Одер	89	3100

Приведенные величины ПДК следует рассматривать как ориентировочные, так как они рассчитаны исходя из предположения, что поступление БЭ с водотоком определяется предельно допустимыми величинами модулей стока с водосборной территории без учета ее функции биогеохимического барьера.

На основании величин максимально допустимого поступления соединений фосфора и азота на субакватории Балтийского моря¹ были определены средневзвешенные значения максимально допустимых модулей материкового стока на акваторию Балтийского моря, которые составили $12,2 \text{ кг} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ по фосфору и $350 \text{ кг} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ по азоту. За период 1997-2003 гг. величины средних значений модулей фактического биогенного стока с территории водосборного бассейна Балтийского моря превысили максимально допустимые значения в 1,7 и 1,2 раза по фосфору и азоту соответственно. При этом наибольшее превышение максимально допустимого биогенного стока по совокупности параметров за рассматриваемый период зафиксировано для Центральной Балтики (на 186 % по фосфору и 40 % по азоту). Наблюдается превышение на 40 % по стоку фосфора в Финский залив и на 52 % – в Рижский залив, по стоку азота – на 49 % в Датские проливы и на 45 % – в Каттегат.

Сформулированы следующие **принципы оценки предельных уровней экспорта БЭ** в Балтийское море с территорий стран ХЕЛКОМ:

- Модули биогенного стока на акваторию Балтийского моря с территории его водосборного бассейна не должны превышать $12,2 \text{ кг} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ по фосфору и $350 \text{ кг} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ по азоту.

- Расчет величины необходимого сокращения поступления биогенного элемента с территории страны следует заменить расчетом величины его предельно допустимого поступления.

- Предельные уровни экспорта биогенных элементов с территории страны должны вычисляться с учетом величин их фоновых поступлений.

- Распределение предельных уровней экспорта БЭ следует осуществлять на основании не менее чем двух наиболее информативных параметров, один из которых должен характеризовать антропогенную деятельность на водосборе.

- В качестве параметров для расчета предельных уровней экспорта фосфора рекомендуется выбрать площадь территории и численность населения, выраженные в относительных величинах; для расчета предельных уровней экспорта азота – площади территории и сельхозугодий, выраженные в относительных величинах.

- Предельные уровни экспорта БЭ с территории данной страны на рассматриваемую субакваторию следует устанавливать на основании предложенных индексов нормирования экспорта БЭ.

Четвертая глава посвящена разработке методов дифференцированной оценки выноса фоновой и антропогенной биогенной нагрузки с водами рек бассейна Балтийского моря.

Основным поставщиком биогенных веществ природного и антропогенного происхождения в Балтийское море является речной сток; БЭ частично аккумулируются и иммобилизуются на территории бассейнов рек или захораниваются в грунты водотоков и промежуточных водоемов, в связи с чем в замыкающих створах водотоков не наблюдается такого значительного увеличения концентраций БЭ, какого можно было бы ожидать. Таким образом, оценка лишь источников биогенных веществ еще не может служить показателем их поступления в водоемы, следовательно, очевидна необходимость не только количественной оценки источников биогенных веществ на территории бассейна, но и дифференцированной фоновой и антропогенной составляющих биогенного стока рек в замыкающих створах.

М. П. Максимовой⁴ для расчетов антропогенной и фоновой составляющих биогенного стока рек были предложены фоновые эмпирические коэффициенты K , представляющие собой соотношения концентраций БЭ Si/N и Si/P , величины которых в речном стоке, не загрязненном антропогенными добавками азота и фосфора, постоянны и не зависят от колебаний водности. При наличии фоновых коэффициентов расчет антропогенной составляющей биогенного речного стока осуществляется в соответствии с уравнением:

$$A = B - Si_{\text{мин. раств.}}/K, \quad (17)$$

где A – антропогенная составляющая стока рассматриваемой формы БЭ; B – суммарный речной сток рассматриваемой формы БЭ; K – фоновый коэффициент для рассматриваемой формы БЭ; $Si_{\text{мин. раств.}}$ – вынос минерального растворенного кремния речным стоком за расчетный год. Как следует из уравнения

⁴ Максимова М. П. Критерии антропогенного евтрофирования речного стока и расчет антропогенной составляющей биогенного стока рек // Водные ресурсы. 1979. №1. С. 35-40.

(17), второй его член представляет собой фоновое поступление БЭ с речным стоком.

Предлагаемый нами подход (именуемый далее метод I) к оценке фоновых коэффициентов БЭ для р. Невы базируется на предположении о наличии тесной корреляционной связи между величинами соотношений Si/БЭ и концентрациями БЭ. Для расчета фоновых коэффициентов была проведена обработка данных о содержании кремния, общего ($P_{\text{общ}}$) и валового фосфора ($P_{\text{вал}}$) в истоке р. Невы за период с 1990 г. по 2008 г., а также общего азота ($N_{\text{общ}}$) за период с 1999 г. по 2008 г., в результате чего были выявлены корреляционные уравнения, связывающие величины фоновых коэффициентов БЭ и их концентрации (табл. 5).

Таблица 5. Зависимости фоновых коэффициентов от концентраций БЭ для р. Нева

БЭ	Уравнение	r^2
$P_{\text{общ}}$	$K_{P_{\text{общ}}} = 34,4 \cdot \exp(-0,0354 \cdot P_{\text{общ}})$ (18)	0,79
$P_{\text{вал}}$	$K_{P_{\text{вал}}} = 16,3 \cdot \exp(-0,0177 \cdot P_{\text{вал}})$ (19)	0,74
$N_{\text{общ}}$	$K_{N_{\text{общ}}} = 2,35 - 0,298 \cdot \ln(N_{\text{общ}})$ (20)	0,89

Для оценки величин эмпирических фоновых коэффициентов в истоке р. Невы были выбраны концентрации БЭ, соответствующие периоду наименьшей антропогенной нагрузки как на Ладожское озеро, так и на вытекающую из него р. Неву (до начала 1960-х гг.): $P_{\text{общ}} = 9 \text{ мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$, $P_{\text{вал}} = 12 \text{ мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$, $N_{\text{общ}} = 405 \text{ мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$ (табл. 6).

Таблица 6. Фоновые эмпирические коэффициенты и уравнения для расчета выноса фоновой биогенной нагрузки со стоком р. Невы и ее рукавов

БЭ	K	Уравнение
$P_{\text{общ}}$	25	$Q_{P_{\text{общ}}} = Q_{\text{Si}}/25 = 0,0315 \cdot C_{\text{Si}} \cdot R_{\text{СГ}}/25$ (21)
$P_{\text{вал}}$	13	$Q_{P_{\text{вал}}} = Q_{\text{Si}}/13 = 0,0315 \cdot C_{\text{Si}} \cdot R_{\text{СГ}}/13$ (22)
$N_{\text{общ}}$	0,56	$Q_{N_{\text{общ}}} = Q_{\text{Si}}/0,56 = 0,0315 \cdot C_{\text{Si}} \cdot R_{\text{СГ}}/0,56$ (23)

Примечание. Q_{Si} – поступление кремния, $\text{т} \cdot \text{год}^{-1}$; C_{Si} – среднегодовая концентрация кремния, $\text{мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$.

На основании полученных результатов были оценены фоновая и антропогенная составляющие биогенного стока с р. Нева в Невскую губу: фоновые составляющие поступления $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{вал}}$ за рассматриваемый период составили в среднем $621 \text{ т} \cdot \text{год}^{-1}$ и $1180 \text{ т} \cdot \text{год}^{-1}$ соответственно – 34 % от суммарного поступления, среднее фоновое поступление $N_{\text{общ}}$ – $20900 \text{ т} \cdot \text{год}^{-1}$ (32 %).

Для оценки фоновых концентраций БЭ в водотоках и фоновых составляющих биогенного стока нами был также разработан метод (именуемый далее метод II), основанный на предложенной Дж. Дэвис и Дж. Цобристом зависимости концентраций растворенного вещества в реке (C) от величин обратных расходов воды 1/R:

$$C = A/R + b, \quad (24)$$

где b – фоновая концентрация растворенной формы БЭ; A – антропогенное поступление БЭ в единицу времени.

В рамках предложенного нами метода на первом этапе на основе данных о концентрациях БЭ (на примере фосфора) в водотоке за несколько лет и расходах воды за тот же период проводится определение фоновой концентрации $P_{\text{общ}}$. На втором этапе выявляются количественные соотношения между концентрациями $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{вал}}$, на основании которых определяются величины фоновых концентраций $P_{\text{вал}}$; необходимость такой процедуры обусловлена тем, что рассматриваемый метод может быть использован только применительно к растворенным в воде формам БЭ и не распространяется на оценку фоновых концентраций валовых форм. Определенные нами величины фоновых концентраций $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{вал}}$ для некоторых рек бассейна Балтийского моря приведены в таблице 7.

Таблица 7. Фоновые концентрации общего и валового фосфора для некоторых рек бассейна Балтийского моря

Река	Фоновая концентрация, мкг·дм ⁻³	
	$P_{\text{общ}}$	$P_{\text{вал}}$
Нева	11	16
Великая	24	41
Луга	21	24
Желча	9	22
Нарва	19	25

На основании полученных результатов были определены величины фоновой и антропогенной составляющих стока $P_{\text{вал}}$ с водами ряда рек бассейна Балтийского моря (табл. 8).

Таблица 8. Величины (Q) и модули (M) фонового стока $P_{\text{вал}}$ для некоторых рек бассейна Балтийского моря

Река	$Q(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}$, т·год ⁻¹	$M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}$, кг·км ⁻² ·год ⁻¹	Составляющие суммарного стока, %	
			фоновая	антропогенная
Нева	1220	4,3	34	66
Великая	197	7,8	43	57
Нарва	288	5,1	45	55
Луга	76	5,8	22	78
Желча	8,9	7,3	52	48

Следует подчеркнуть, что фоновый биогенный сток для всех рассмотренных рек соизмерим с антропогенным; это обуславливает необходимость учета фонового стока при оценке предельных уровней экспорта БЭ в приемные водоемы.

Достоверность полученных результатов подтверждается данными, приведенными в таблице 9, на примере р. Невы: величины фонового стока $P_{\text{вал}}$, рассчитанные нами на основе методов I и II, а также полученные С. А. Кондратьевым методом математического моделирования, весьма близки.

Таблица 9. Величины фонового стока $P_{\text{вал}}$ с р. Нева и ее рукавами в Невскую губу, определенные разными методами

Метод	$Q(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}, \text{т} \cdot \text{год}^{-1}$
I	1180
II	1220
С. А. Кондратьев	1150

В связи с тем, что рассмотренные выше методы оценки фоновой составляющей биогенного стока применимы только в случае контролируемых рек, для которых имеются ряды данных гидрохимических и гидрологических наблюдений, очевидна необходимость разработки метода, который мог бы быть применен также и для неконтролируемых рек.

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.

Соотношение величин фоновой составляющей экспорта фосфора в водоемы и чистой продукции наземной растительности (ТТР) зависит от скорости разложения наземной растительности, определяемой в значительной мере температурой среды. В среднем для северного полушария вынос фосфора в водоемы с единицы площади природных ландшафтов (модуль фонового стока $M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}$) составляет около 2 % содержания фосфора в первичной продукции, то есть $M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}} / \text{ТТР} = 0,02^5$. При этом в направлении от арктических широт к тропическим эффективность выноса фосфора изменяется от 0,3 % до 6 %.

В. В. Бульоном⁶ было высказано предположение о применимости уравнения Вант-Гоффа к скорости разложения чистой продукции наземной растительности. Используя эмпирические зависимости⁶ величин ТТР от температуры и суммы осадков и зависимости температуры и суммы осадков от географической широты местности φ , нами были получены уравнения зависимости модуля фонового стока фосфора ($M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}, \text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) от географической широты местности:

$$M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}} = 48 \cdot \frac{2^{1,62 - 0,0410 \cdot \varphi}}{1 + e^{(0,0488 \cdot \varphi - 2,04)}} \quad (25)$$

$$M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}} = 48 \cdot 2^{1,62 - 0,0410 \cdot \varphi} \cdot (1 - e^{(0,0169 \cdot \varphi - 1,43)}) \quad (26)$$

Уравнение (25) соответствует лимитированию чистой продукции наземной растительности температурой, а уравнение (26) – осадками.

На основании фактических данных⁶ нами была предложена эмпирическая зависимость между модулем фонового стока валового фосфора с водо-

⁵Коплан-Дикс И. С., Назаров Г. В., Кузнецов В. К. Роль минеральных удобрений в эвтрофировании вод суши. – Л.: Наука, 1985. 182 с.

⁶Бульон В. В. Эвтрофирование и деэвтрофирование озер как реакция на изменение фосфорной нагрузки с водосборной площади // Теория и практика восстановления внутренних водоемов / Под ред. Румянцева В. А., Кондратьева С. А. – СПб: Лема, 2007. С. 44-54.

сборной территории и широтой местности для интервала широт от 10° с.ш. до 70° с.ш. (метод III):

$$M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}} = 221 - 52,3 \cdot \ln \varphi \quad (27)$$

На основании полученной зависимости (27) были выполнены расчеты фонового стока валового фосфора для ряда рек бассейна Балтийского моря по разработанному нами алгоритму; результаты расчетов по методу III сопоставлены с результатами, полученными в рамках метода II (табл. 10).

Расхождение между результатами, полученными в рамках двух методов, варьирует от 5 % до 34 %, что по нашему мнению вполне допустимо, учитывая точность подобного рода оценок. Метод III дает в целом более высокие значения фонового поступления валового фосфора, чем метод II; по-видимому, это объясняется тем, что метод III не позволяет учитывать удержание фосфора в гидрографической сети, в то время как при оценке фонового поступления валового фосфора по методу II используются данные гидрохимических измерений в замыкающих створах рек, реально учитывающие удержание фосфора поверхностными водами суши.

Таблица 10. Фоновое поступление валового фосфора со стоком некоторых рек бассейна Балтийского моря

Река	Метод II		Метод III		Δ Q, %
	$M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}$, кг·км ⁻² ·год ⁻¹	$Q(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}$, т·год ⁻¹	$M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}$, кг·км ⁻² ·год ⁻¹	$Q(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}$, т·год ⁻¹	
Нева	4,3	1221	4,9	1382	12
Луга	5,8	76	6,8	90	16
Нарва	5,1	288	7,8	439	34
Желча	7,3	8,9	7,7	9,4	5
Великая	7,8	197	9,3	234	16

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 $P_{\text{вал}}$ 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 %. Учитывая полученный результат, нами в первом приближении были рассчитаны модули и величины фонового стока валового фосфора с водосборов ряда рек бассейна Балтийского моря (табл. 11).

Таблица 11. Модули и величины фонового стока валового фосфора для некоторых рек бассейна Балтийского моря

Река	Приемный водный объект	$\varphi_{\text{ср.}}$, °с.ш.	$M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}$, кг·км ⁻² ·год ⁻¹	F, км ²	$Q(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}}$, т·год ⁻¹
Пскова	р. Великая	57,88	8,3	1000	8,3
Пиуза	Псковское озеро	57,88	8,3	800	6,6
Гдовка	Чудское озеро	58,70	7,5	150	1,1

Сороть	р. Великая	57,08	9,0	3910	35,2
Синяя	р. Великая	57,15	8,9	2040	18,2
Плюсса	Нарвское водохранилище	58,35	7,8	6550	51,1
Караста	Финский залив	59,88	6,5	55,8	0,36
Коваши	Финский залив	59,85	6,5	612	4,0
Стрелка	Финский залив	59,78	6,5	155	1,0
Черная	Финский залив	60,05	6,3	668	4,2
Шингарка	Финский залив	59,75	6,6	121	0,79
Селезневка	Финский залив	60,80	5,7	623	3,5
Приветная	Финский залив	60,17	6,2	70	0,43
Дудергофка	Финский залив	59,78	6,5	120	0,78
Кикенка	Финский залив	59,83	6,5	68	0,44
Систа	Финский залив	59,72	6,6	672	4,4

На основе метода III нами также были определены величины фоновой составляющей стока валового фосфора и модуля фонового стока валового фосфора в Балтийское море с территории его водосборного бассейна:

$$Q(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}} = 11960 \text{ т} \cdot \text{год}^{-1}; \quad M(P_{\text{вал}})^{\text{ФОН}} = 7,0 \text{ кг} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}.$$

Полученные нами результаты расходятся с данными² по фоновым поступлениям фосфора в Балтийское море ($10964 \text{ т} \cdot \text{год}^{-1}$), предоставленными странами ХЕЛКОМ, на 10 %.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о допустимости применения предложенного нами метода для оценки фонового стока валового фосфора с водосборов рек, в том числе частично контролируемых и неконтролируемых.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. Показано, что расчет величины необходимого сокращения поступления биогенного элемента с территории страны следует заменить расчетом величины его предельно допустимого поступления.

2. Выявлены основные геоэкологические факторы, влияющие на поступление биогенных элементов в Балтийское море с территории водосборного бассейна. На величину экспорта фосфора наибольшее влияние оказывают площадь территории и численность населения, на величину экспорта азота – площадь территории и сельхозугодий.

3. Проведена оценка относительной значимости выявленных факторов в их совокупном влиянии на формирование биогенного стока в Балтийское море. Для величины суммарного экспорта фосфора значимость фактора заселенности почти в два раза превышает значимость фактора площади; для величины суммарного экспорта азота значимость фактора площади почти в два раза превышает значимость фактора аграрности. При переходе к величинам антропогенной составляющей биогенного экспорта возрастает значимость факторов, характеризующих интенсивность антропогенной деятельности на водосборе: фактора заселенности – более чем в 8 раз, фактора аграрности – более чем в 3 раза.

4. Разработан метод оценки максимально допустимого биогенного стока с территорий стран бассейна Балтийского моря с учетом фоновой составляющей стока.

5. Предложенный нами метод нормирования биогенного экспорта в Балтийское море с территорий стран ХЕЛКОМ позволяет учесть проводимую рядом стран эффективную природоохранную политику. Для стран, характеризующихся низкими величинами антропогенной составляющей биогенного экспорта на акваторию Балтийского моря, рассчитанные в рамках такого подхода относительные уровни требуемого сокращения биогенной нагрузки, обоснованно снижены.

6. Сформулированы принципы оценки предельных уровней экспорта БЭ в Балтийское море с территорий стран ХЕЛКОМ.

7. Предложены индексы нормирования экспорта БЭ для расчета предельных величин экспорта биогенных элементов на субакватории Балтийского моря с территорий стран ХЕЛКОМ.

8. На основании величин допустимых нагрузок на субакватории Балтийского моря оценены предельно допустимые концентрации валового фосфора и общего азота для крупнейших рек бассейна с учетом площадей их водосборных бассейнов и средних многолетних расходов воды.

9. Разработан метод дифференцированной оценки фоновой и антропогенной составляющих биогенного стока с водами контролируемых рек бассейна Балтийского моря, основанный на применении эмпирических фоновых коэффициентов.

10. Предложен метод оценки фоновых концентраций биогенных веществ в реках бассейна Балтийского моря, основанный на зависимости концентраций растворенных веществ в реке от величин обратных расходов воды.

11. Разработан метод оценки фоновой составляющей стока валового фосфора с водами неконтролируемых рек бассейна Балтийского моря.

Публикации по теме диссертации

1. Степанова Е. В., Фрумин Г. Т. План действий по Балтийскому морю: проблема эвтрофирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Геология, география. 2009. Вып. 1. С. 99-104.

2. Степанова Е. В. Оценка фоновой составляющей стока валового фосфора с водами контролируемых и неконтролируемых рек бассейна Балтийского моря // Молодой ученый. 2009. № 11.

3. Степанова Е. В. Квотирование биогенной нагрузки на Балтийское море с учетом фоновой составляющей биогенного стока // Молодой ученый. 2009. № 11.

4. Степанова Е. В. Разработка принципа квотирования биогенной нагрузки на Балтийское море // Современные экологические проблемы и их решение: взгляд молодежи: Материалы конференции / Под ред. Флоринской Т. М. – СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2008. С. 129-134.

5. Степанова Е. В., Фрумин Г. Т. Методы оценки выноса фоновой биогенной нагрузки с водами рек бассейна Балтийского моря // Устойчивое разви-

тие 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.

6. Фрумин Г. Т., Степанова Е. В. Квотирование биогенной нагрузки на Балтийское море // Сборник тезисов IX Международного экологического форума «День Балтийского моря». – СПб.: ООО «Изд-во «ДИАЛОГ», 2008. С. 318-319.

7. Фрумин Г. Т., Степанова Е. В. К вопросу о квотировании биогенной нагрузки на Балтийское море // География и смежные науки. LXI Герценовские чтения: Материалы межвузовской конференции. Факультет географии РГПУ им. А. И. Герцена 24-25 апреля 2008 г. / Под ред. Ловелиуса Н. В. – СПб.: Тесса, 2008. С. 334-339.

8. Фрумин Г. Т., Степанова Е. В. Природная и антропогенная составляющие биогенного сока реки Невы в Невскую губу // Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография / Под ред. Нестерова Е. М. – СПб.: Эпиграф, 2008. С. 142-145.

9. Фрумин Г. Т., Степанова Е. В. Экологические проблемы Балтийского моря: современное состояние и пути решения // Организмы, популяции, экосистемы: проблемы и пути сохранения биоразнообразия. Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Водные и наземные экосистемы: проблемы и перспективы исследований». Вологда, 24-28 ноября 2008 г. – Вологда, 2008. С. 151-154.

10. Фрумин Г. Т., Степанова Е. В. План действий по Балтийскому морю. Раздел эвтрофирование // Экологическая химия. 2009. Т. 18. Вып. 1. С. 1-9.

11. Фрумин Г. Т., Степанова Е. В. Фоновые концентрации биогенных элементов в реках бассейна Балтийского моря // Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон, ЭКОГИДРО-МЕТ. Материалы V международной конференции. Санкт-Петербург, 7-9 июля 2009 г. – СПб.: Крисмас+, 2009. С. 136-137.

12. 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.

13. Каретникова Т. И., Фрумин Г. Т., Степанова Е. В. Качество вод водотоков Санкт-Петербурга в 2007 году // Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2007 году / Под. ред. Голубева Д. А., Сорокина Н. Д. – СПб.: «Сезам-Принт», 2008. С. 201-222.

14. Каретникова Т. И., Гуревич И. Г., Фрумин Г. Т., Степанова Е. В. Качество вод водотоков Санкт-Петербурга в 2008 году // Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2008 году / Под. ред. Голубева Д. А., Сорокина Н. Д. – СПб.: «Сезам-Принт», 2009. С. 210-231.

15. Frumin G. T., Stepanova E. V. Limitation of nutrient loading to the Baltic Sea // IX International Environmental Forum «Baltic Sea Day»: Theses collection. – Saint-Petersburg, 2008. P. 320.

16. Frumin G. T., Stepanova E. V. Background nutrients concentrations in the rivers of the Baltic Sea basin // X International Environmental Forum «Baltic Sea Day». – Saint-Petersburg, 2009. P. 334-335.