

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Шарафутдинова Гульнара Феметдиновна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКЦИОННО-
ДЕСТРУКЦИОННЫХ ОТНОШЕНИЙ В ОЗЕРНЫХ
ЭКОСИСТЕМАХ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Специальность 25.00.36 – Геоэкология (Науки о Земле)

Санкт-Петербург 2013

Работа выполнена на кафедре Прикладной экологии Факультета экологии и физики природной среды
Российского государственного гидрометеорологического университета
и
в НИЛ Моделирования и диагностики геосистем Факультета географии и геоэкологии Санкт-
Петербургского государственного университета

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор
Дмитриев Василий Васильевич
Санкт-Петербургский государственный
университет

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор
Осипов Георгий Константинович
Военно-космическая академия имени
А.Ф.Можайского

кандидат географических наук, доцент
Федорова Ирина Викторовна
Арктический и антарктический научно-
исследовательский институт

Ведущая организация: Институт озероведения РАН

Защита состоится 11 февраля 2014 г. в «17» часов на заседании диссертационного совета Д 212.197.03 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, пр. Металлистов, д.3, аудитория 102.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр-т, д. 98.

Автореферат разослан 9 января 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.197.03,
доктор географических наук, профессор

Е.С. Попова

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Интерес к анализу продукционно-деструкционных отношений в водоеме обусловлен увеличивающимися темпами антропогенного эвтрофирования, которое является на сегодняшний день глобальной экологической проблемой. Практически отсутствуют рекомендации по управлению эвтрофированием водоемов и деэвтрофированию водных экосистем. Тем не менее, при всей очевидной важности такие параметры как скорость продуцирования (P) и деструкции (D) органического вещества не входят в перечень основных компонентов геоэкологического мониторинга.

Однако, P/D -отношение является достаточно репрезентативным показателем, с помощью которого можно оценить способность системы к самоочищению. Это отношение так же показательно в транзитных речных экосистемах, в которых, как правило, $P/D < 1$. Например, при принятии решений о возможности строительства комплекса защитных сооружений в Невской губе, ее водную экосистему оценивали, как загрязненную, но при этом имеющую $P/D < 1$, а значит способную к самоочищению.

В этом плане продукционно-деструкционные отношения можно рассматривать как маркер или индикатор развития естественного и антропогенного эвтрофирования водоема. Создание модели продукционно-деструкционных отношений в водной экосистеме (P/D -модели) предполагает учет влияния физических, химических и биологических факторов на формирование первичной продукции и деструкции, с ее помощью реализуется системный подход к решению проблемы.

Степень разработанности темы исследования обусловлена как развитием новых методов мониторинга продукционно-деструкционных процессов в водоемах, так и созданием моделей и их апробацией для водных экосистем.

Главная проблема, рассматриваемая в данной работе, состоит в оценке вклада антропогенной составляющей в процесс эвтрофирования водоема на основе P/D -отношения с помощью анализа совокупного воздействия абиотических и биотических факторов среды на состояние водной экосистемы.

Объектами исследования являются малые озера Карельского перешейка.

Предмет исследования – продукционно-деструкционные отношения планктонного сообщества в водоемах аккумулярующего типа с замедленным водообменом.

Цель работы: Количественная оценка формирования продуктивности и возможности самоочищения экосистем малых озер на основе математического моделирования и данных мониторинга. Для достижения поставленной цели, решались следующие задачи:

1. Проведение натурных наблюдений на четырех озерах Карельского перешейка, различающихся по режиму продуцирования органического вещества, в 2010-2012 гг.;

2. Формализация влияния факторов среды и биоты на продукционно-деструкционные отношения в малых озерах;
3. Селекция алгоритмов для представления факторного воздействия и разработка P/D-модели в целом;
4. Идентификация и верификация разработанной модели на озерах Карельского перешейка по натурным и литературным данным;
5. Апробация P/D-модели и оценка P/D-баланса органического вещества планктонного сообщества в водоемах различной трофности по результатам моделирования и натурным данным.

Научная новизна. В диссертации впервые:

- сформулирована и реализована модель первичной продукции и деструкции органического вещества, отличающаяся одновременным учетом воздействующих факторов физической, химической и биологической природы;
- предложена методика оценки формирования первичной продукции и самоочищения в малых озерах по разработанной автором модели, учитывающей влияние различных факторов естественного и антропогенного воздействия;
- на основе модельных расчетов выполнена оценка изменения продукционных возможностей озер и их самоочищения при различных сценариях изменения физических, химических и биологических факторов;
- разработана методика оценки баланса процессов образования и разрушения органического вещества озерных экосистем с учетом степени насыщения воды аллохтонным органическим веществом и степени гумозности озер.

Фактический материал и личный вклад автора.

Автором были проведены исследования состава и свойств водных экосистем озер Карельского перешейка в 2010-2011 гг. С 2009 по 2012 год автор принимал участие в ежегодной производственной практике студентов СПбГУ на оз. Суури по оценке экологического состояния водных объектов. Количество отобранных и обработанных автором проб превышает 4000. В 2009-2010 гг. участвовала в выполнении проекта РФФИ 09-05-01000-а «Разработка и апробация моделей продукционно-деструкционных отношений, самоочищения и интегральной оценки продуктивности водных экосистем». Автор организовала и провела все экспедиционные исследования по гранту, обобщила литературный материал по 40 озерам Карельского перешейка с 1958 по 2012 гг. Создана информационная база по элементам режимов, показателям химического и биологического состава и физических свойств воды.

Выполнено экспериментальное определение параметров функциональных зависимостей используемых в модели. Был разработан и апробирован метод определения подводной освещенности на основе измерений оптической плотности воды.

Автором выполнена алгоритмическая реализация влияния факторов среды и биоты на скорости первичного продуцирования и деструкции органического вещества (*ОВ*) в озерных экосистемах. Сформулированы сценарии по выявлению изменения параметров естественного режима и естественных параметров на водную экосистему. Выполнена компьютерная реализация, анализ и ГИС-визуализация результатов натурных наблюдений и модельных экспериментов.

Практическая значимость работы.

- разработанная модель может использоваться для оценки продукционно-деструкционных отношений в водных экосистемах для целей управления эвтрофированием и качеством воды в водоемах. *P/D*-показатель рекомендуется использовать в качестве индикатора естественного и антропогенного эвтрофирования и для оценки вклада компонентов биоты в биохимическое самоочищение водоемов;
- на основе модели выявлена степень влияния вклада различных факторов среды в формирование продукционно-деструкционных отношений в водной экосистеме и ее самоочищение;
- расчет скорости первичного продуцирования и деструкции на основе одновременного учета факторов среды рекомендован к включению в список параметров геоэкологического мониторинга;
- модель использовалась в образовательном процессе кафедры Прикладная экология РГГМУ при проведении практических занятий с магистрантами по курсу «Системная экология».

Теоретико-методологическую основу исследования составили труды Ю. П. Одума, Г. Г. Винберга, А. Ф. Алимова, Д. Э. Хатчинсона, В. А. Абакумова, Ю. Н. Сергеева, Г.К. Осипова, С.А. Кондратьева и др.

Методы исследования. Основным методом исследования являлось экологическое моделирование скоростей обменных процессов в водных экосистемах, с учетом факторов влияющих на них, а также системных компонентов химической и биологической природы. В исследовании применялись методы мониторинга поверхностных вод, ГИС-технологии, использование теории баз данных, методы статистического, регрессионного анализа и др.

Защищаемые научные положения:

1. Модель продукционно-деструкционного баланса в водоемах различной трофности при одновременном учете воздействующих факторов;

2. Методика научно-обоснованной оценки баланса процессов образования и разрушения органического вещества на основе данных мониторинга, выполненного автором, и математического моделирования влияния различных факторов на эти процессы;

3. Вывод о существовании характерных особенностей продуцирования органического вещества и самоочищения водоемов различной трофности, полученный на основе экспериментов с моделью;

4. Оценочная шкала отношения процессов образования и разрушения органического вещества, характеризующая способность водоемов различных типов гумозности к самоочищению;

5. Вывод о необходимости рекомендации такого параметра, как P/D-отношение, в качестве репрезентативного показателя трофического статуса водоема и его способности к самоочищению в геоэкологическом мониторинге.

Публикации. Основные положения и выводы работы были изложены в публикациях в научных журналах и сборниках материалов конференций, в том числе в журналах «Ученые записки РГГМУ» (№12, 2010; реферируется ВАК), и «Известия РГПУ им. А.И. Герцена» (№153 (2), 2012; реферируется ВАК). Всего за время написания диссертации было опубликовано 10 научных работ.

Степень достоверности результатов.

Сходимость фактических и рассчитанных с помощью предложенной модели данных проверялась с помощью следующих статистических критериев: критерий случайности, критерий 0.674σ и коэффициент корреляции. Прогноз значений первичной продукции (P) как на этапе идентификации (по собственным данным), так и на этапе верификации модели (по литературным данным) можно считать удовлетворительным по предложенным статистическим критериям. Получено удовлетворительное соответствие модельных и натуральных значений продукционно-деструкционных отношений (P/D) на этапе идентификации модели. Оценена достоверность результатов верификации модели.

Апробация результатов.

Результаты работы были доложены на следующих конференциях: Научная сессия факультета географии и геоэкологии СПбГУ: География в XXI веке (СПбГУ, 2010 г.); Международная конференция, посвященная 165-летию создания РГО и 85-летию организации географического факультета в СПбГУ «География в системе наук о земле: современные проблемы науки и образования» (СПбГУ, 2011 г.); Итоговая сессия ученого совета РГГМУ факультета географии и геоэкологии (РГГМУ, 2012 г.); Международная конференция, посвященная 90-летию почетного профессора СПбГУ, д.г.н. А.Г. Исаченко «Современные проблемы географии и геоэкологии» (СПбГУ, 2012 г.); Международная молодежная конференция «Науки о Земле и цивилизация» (РГПУ им. А.И. Герцена, 2012 г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 204 наименований, содержит одно приложение. Работа объемом 192 стр., содержит 40 рисунков и 10 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется основная цель и задачи диссертационного исследования, новизна работы, раскрывается практическая значимость, а так же перечисляются положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены и уточнены определения основных терминов, употребляемых в работе. Основные термины и понятия, которыми оперируем в работе были: первичная продукция (*ПП*) фитопланктона (мг сух.веса/л·сут); деструкция органического вещества планктонным сообществом, траты на обмен (мг сух.веса/л·сут); *P/D*-отношение; удельная скорость роста фитопланктона, *P/B*-коэффициент (сут⁻¹) и интенсивность деструкции (сут⁻¹).

Основной характеристикой является *P/D*-отношение, где *P* и *D* – суммарные за определенный период времени значения скорости продуцирования *ОВ* фитопланктоном и скорости его деструкции планктонным сообществом. Эта характеристика отражает эффективность продукционных процессов в водоеме в целом. Так принято считать, что в олиготрофных озерах суммарный за год баланс органического вещества часто является отрицательным, т.е. $P/D < 1$; в мезотрофных и эвтрофных водоемах $P/D \approx 1$. Годовое отношение $P/D > 1$ наблюдается в редких случаях в водоемах с неустойчивым режимом. Но, как показывает практика, подобные утверждения верны не всегда.

Выполнен обзор развития представлений о процессах первичного продуцирования и деструкции органического вещества в водных экосистемах.

Предпосылкой к изучению продукционно-деструкционных отношений стал выдвинутый в 1934 г. Л.Л. Россолимо принцип балансового изучения водоемов, в котором особое место занимал баланс органического вещества.

Балансовое уравнение считалось применимым только при условии, что совокупность превращений органического вещества в водоеме рассматривается с энергетической стороны. Ведь вещество и энергия участвуют в биотическом круговороте различным образом: энергия в отличие от вещества может быть использована только один раз.

25 мая 1932 г. на подмосковном оз. Белом в Косино Г.Г. Винбергом впервые были проведены измерения интенсивности фотосинтеза планктона с помощью «метода склянок» с целью получения количественного представления о скорости новообразования органических веществ в озере.

Необходимость измерения первичной продукции как первого этапа продукционного процесса, или начального уровня биотического потока энергии, уже в 1930-е годы стала получать все более широкое признание. Авторы, плодотворно работавшие в этом направлении: Г.Г. Винберг, Райли, Д. Э. Хатчинсон, Джеди, В.И. Вернадский, В.С. Ивлев, С.В. Бруевич, Линдеман, Макфэдъен, Эльстер, Калле, Грим, Ю.П. Одум, Г.Т. Одум, А.П. Щербаков, А.В. Ассман, В. Оле.

После первых успехов и поражений в новом «продукционном» направлении лимнологии, исследования пошли по пути спецификации и локализации. Другими словами процесс новообразования органического вещества стал рассматриваться более детально под разными «углами» в факториальной экологии, методологии или в прикладном значении, как способ определения трофического состояния водоема.

Например, известны работы по первичной продукции самых различных водоемов, таких как арктические озера Аляски, временные водоемы Антарктиды и тропические озера Африки. После разработанного в 1932 г. кислородного метода, в 1951 г. был предложен более чувствительный радиоуглеродный метод. А после 1961 г. стали появляться статьи, в которых был описан метод определения биологической продуктивности водоема по содержанию хлорофилла *a* и т.д. Стали появляться работы по влиянию состава и обилия фито- и зоопланктона на продуктивность озер.

При комплексных исследованиях водоемов первичная продукция становится неотъемлемой частью рабочих программ. В настоящее время проводится достаточное количество конференций по этому направлению.

Описаны основные факторы и характер их воздействия на скорости обменных процессов.

Благодаря единому объективному способу выражения первичной продукции, например, в калориях на единицу площади за определенное время независимо от видового состава продуцентов, возникает возможность рассматривать эту величину в качестве функции ограниченного числа переменных.

Первостепенной задачей было выбрать оптимальное адекватное количество факторов, воздействующих на главные аспекты превращения органического вещества в водоемах.

В работе были выделены следующие главные факторы: температура воды (t); солнечная радиация (I_0); прозрачность воды (SD); содержание биогенных элементов фосфора, азота и кремния (Ph , N , Si); содержание тяжелых металлов ($3B$); активная реакция среды (pH); биомасса фито- (B), зоо- (Z) и бактериопланктона (B).

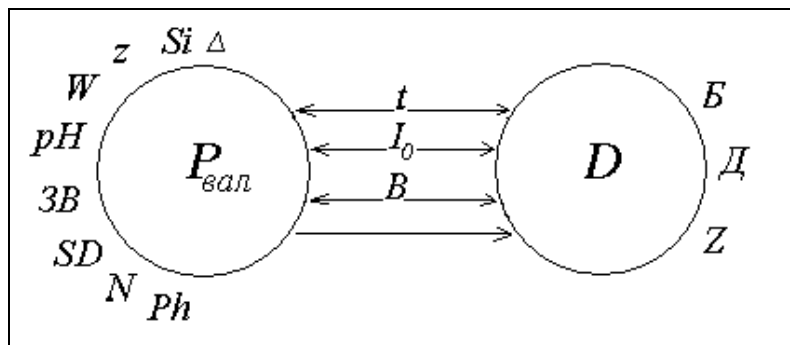


Рисунок 1 – Общая схема воздействия абиотических и биотических факторов среды на продукционно-деструкционные отношения в водной экосистеме на «планктонном» уровне

Таким образом, с помощью выбранных факторов охвачены гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические параметры окружающей среды, что отражает комплексный подход к решению проблемы.

Так же в этой главе последовательно раскрыты теоретические аспекты воздействия выбранных факторов и различные способы оценки их воздействия на обменные процессы в водоемах, которые со временем изменялись. Это дает более широкую базу для осмысления и селекции оптимальных алгоритмов оценки влияния факторов на скорости продукции и деструкции органического вещества в водоемах.

В начале **второй главы** обсуждается проблема нехватки репрезентативных параметров при составлении схем государственного мониторинга поверхностных вод, поскольку скорости продукции и деструкции OB и их отношение являются маркером антропогенного вмешательства в водную экосистему.

Осуществление мониторинга этих параметров ведется в основном научными учреждениями субъектов РФ при выполнении инициативных фундаментальных и прикладных исследований.

Даже располагая фактическими данными по первичной продукции, отнесение водоема к тому или иному типу трофности с помощью оценочных шкал разных авторов часто не дает однозначный результат, тем более по косвенным характеристикам состава и свойств абиотической среды.

Авторские исследования проводились на трех малых озерах в северной части Карельского перешейка ежемесячно с мая по сентябрь 2010–2011 гг., а также на оз. Суури 1–3 раза в год с 2009 по 2012 гг.

При анализе натуральных данных по четырем озерам было подтверждено, что новообразование органического вещества процесс сложный, зависящий от целого комплекса факторов, воздействие которых нужно учитывать в совокупности. Ни одна из исходных простых гипотез для исследованных озер не подтвердилась, в том числе предположение о том, что более теплый год является более продуктивным и предположение о том, что продуктивность системы с большим содержанием биогенных элементов всегда будет выше;

предположение о куполообразном характере кривой временной изменчивости *ПП* в период открытой воды (в оз. М. Ровенское в оба года зафиксирована чашеобразная (двухвершинная) кривая).

На примере Карельского перешейка, проанализированы все данные по первичной продукции и деструкции *ОВ* в озерах за период с 1958 по 2012 гг., включая литературные источники и натурные наблюдения. Всего исследовано 40 озер.

Анализ пространственной изменчивости *ПП* подтвердил теорию об увеличении продуктивности экосистем от высоких широт к низким. Это связано как с увеличением количества света и тепла, так и с увеличением плотности населения в районах, расположенных южнее. Анализ временной изменчивости показал небольшую тенденцию к увеличению скорости фотосинтеза в озерах с 1958 до 2012 гг.

Необходимо отметить, что «пространственный» тренд значений является более крутым, чем «временной». Так с 1958 по 2012 гг. в среднем значения *ПП* увеличились на 10 %, а увеличение с севера на юг составило 17%. Это представляется вполне закономерным. Ведь более благоприятные условия для развития фитопланктона (больше света, теплее) в южной части рассматриваемой территории исторически были всегда, тогда, как антропогенный фактор, выражающийся в увеличении *ПП* со временем, – гораздо «моложе».

Все озера были формально поделены на четыре группы по месторасположению на рассматриваемой территории (рисунок 2, таблица 1). При составлении карты использована информация с сайта www.oblmap.ru.

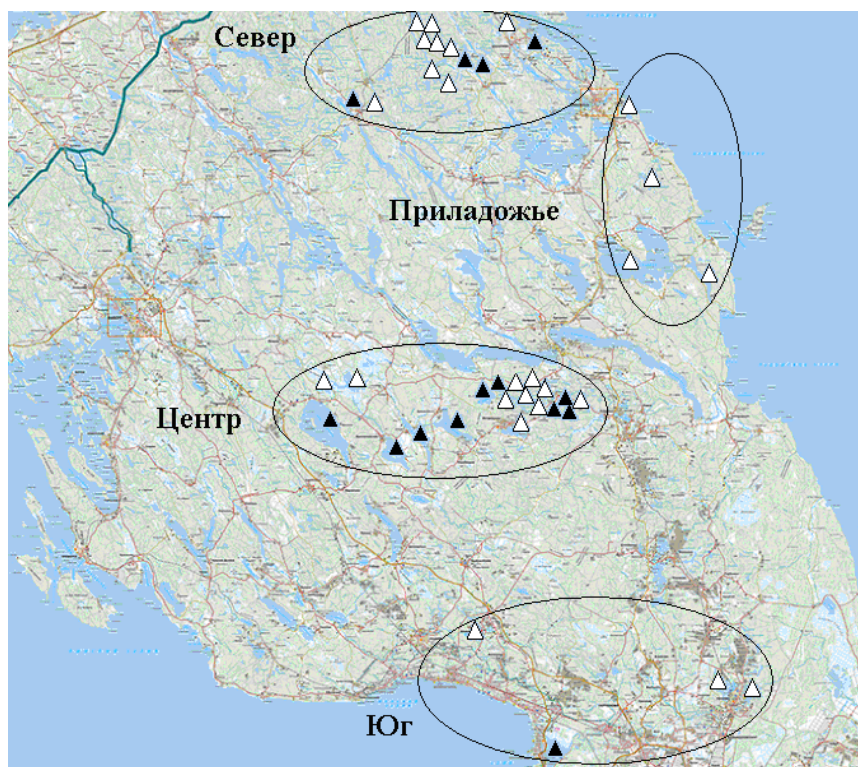


Рисунок 2 – Схема распределения исследуемых озер по четырем выделенным группам. Белым цветом показаны мезотрофные водоемы, черным – эвтрофные

Таблица 1 – Диапазоны и трехсредние значения A_{\max} для выделенных групп озер Карельского перешейка

Характеристика	«Север»	«Приладожье»	«Центр»	«Юг»
диапазоны	0.23-1.46	0.15-0.72	0.09-4.95	0.26-1.38
трехсреднее	0.77	0.34	0.73	0.54
n	23	5	34	4
кол-во озер	13	4	19	4

Анализ рисунка и таблицы показал, что такой параметр как первичная продукция фитопланктона является высоковарьирующим, вследствие своей высокой чувствительности. Даже продолжительные исследования на одном озере зачастую не дают возможности для получения удовлетворительных обобщений, которые можно было бы использовать для прогноза изменений уровня трофности в других озерах.

Далее подробно обсуждаются методы исследований. Кроме классических методов отбора, обработки и анализа гидрофизические и гидрохимические проб, использовались программы для статистической и ГИС-обработки данных.

Отметим, что полученные автором в 2011 году уникальные данные по надводной и подводной освещенности вод озер с помощью прибора «Li-COR» позволили верифицировать новый авторский метод расчета подводной поступающей радиации.

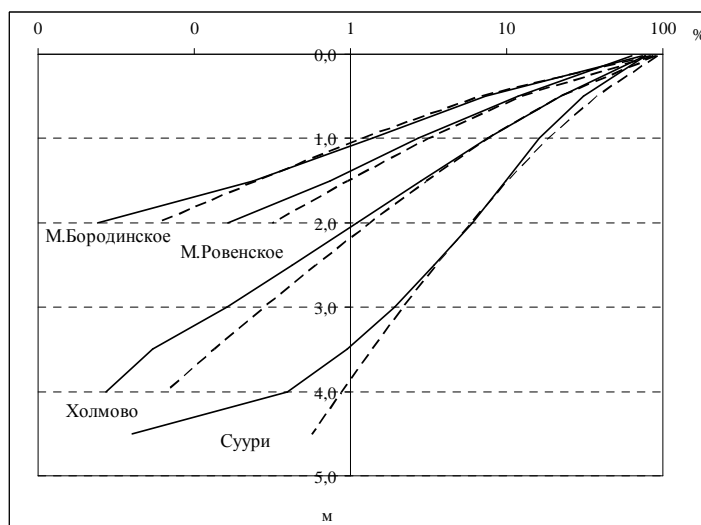


Рисунок 3 – Распределение освещенности в воде четырех озер, измеренной с помощью прибора *Li-COR* (сплошная) и рассчитанной с помощью авторского метода (пунктир)

Авторский подход заключался в сравнении распределения энергии в спектре суммарной радиации на поверхности озера (величина постоянная, отн.ед) с распределением энергии, уже ослабленной столбом воды (рассчитывалась через оптическую плотность) с последующим нахождением % солнечной радиации дошедшей до определенной глубины. Согласно нормативам для прогнозов предложенный метод подходит для практического использования. Так коэффициент корреляции составил 0.99, а критерий случайности – 0.048. По критерию 0.674σ 97 % предсказанных значений оказались удовлетворительными.

В классических работах границу фотической зоны рассчитывают, как 2 или 2.5 глубины прозрачности, что оказалось неверным для исследованных озер, где в среднем она составила 1.5 SD.

Разработан авторский методический подход оценки трат на обмен фитопланктона как единого дыхательно-выделительного процесса. Результаты оценочных исследований для экосистем исследованных озер выявили, что траты на обмен составили от 11 до 33 % от чистой продукции фитопланктона.

Разработка моделей скоростей массообмена включала в себя создание модели скорости продуцирования *OB* в водоеме и модели скорости деструкции *OB* фито- зоо- и бактериопланктоном.

Использовалась гипотеза Митчерлиха об одновременном влиянии факторов на скорость массообмена. Удельная скорость чистого продуцирования *OB* μ_f рассчитывалась как отклик на факторы по принципу их совокупного воздействия. Учитывались такие факторы как температура воды, освещенность и содержание биогенных элементов в водоеме и т.д. Каждый из этих факторов, в свою очередь, снижает или увеличивает максимальную удельную скорость роста μ_{max} , за счет своего недостатка или избытка в системе.

Основными методами создания модели были разработка и селекция алгоритмов расчета частных функций отклика.

В **третьей главе** рассмотрены теоретико-методологические основы моделирования первичной продукции и деструкции органического вещества в водных экосистемах: простейшие популяционные модели, Л и М-подходы; моделирование факторов среды, лимитирующих образование первичной продукции и скорость деструкции *OB*; модель экосистемы в целом.

На следующем этапе описана разработка модели продукционно-деструкционных отношений в водной экосистеме. В этой модели совмещены теоретические разработки, полученные для экологических моделей по влиянию различных факторов на продуктивность экосистемы, с выводами, полученными по экспериментальным данным разных авторов.

Принятые допущения, которые использовались при построении модели:

1. Считалось, что основными гидробионтами в водоеме являются: фитопланктон (*F*), зоопланктон (*Z*) и бактерии (*B*), ассоциированные с детритом (*D*). Рыб и бентос на данном этапе не учитываем;

2. В качестве источника поступления органического вещества рассматривалась продукция только фитопланктона. Принималось, что аллохтонное органическое вещество не влияет на кормность системы;

3. Принималось, что растворенное органическое вещество, попавшее в систему в результате дыхательно-выделительного процесса гидробионтов или внешнего гидролиза бактерий, не влияет на продукционно-деструкционный процесс;

4. Виды фитопланктона, обитающие в одном биотопе, гораздо ближе друг к другу по характеру отклика на воздействие факторов, чем одни и те же виды, обитающие в различных природных условиях (принцип экотипов).

На первом этапе рассчитывалась валовая первичная продукция фитопланктона ($P_{вал}$) по формуле:

$$P_{вал} = (\mu_F + r_F) \cdot B$$

где μ_F – интенсивность чистого первичного биосинтеза фитопланктона, сут⁻¹; B – биомасса фитопланктона, мг сух.веса/л.

Основной задачей автора было смоделировать временные изменения интенсивности первичного продуцирования (μ_F , сут⁻¹) в зависимости от совместного воздействия внешних факторов: температура воды (t), солнечная радиация (I), содержание биогенных элементов (N , Ph), содержание в воде загрязняющих веществ, а именно тяжелых металлов (TM), и активной реакции среды (pH).

При этом весь набор факторов делится на две категории: ресурсные – свет, биогенные элементы и физиологические – температура, тяжелые металлы и pH . Принималось, что законы толерантности относятся в первую очередь к физиологическим факторам, а законы лимитирования – исключительно к ресурсным.

Формулу для нахождения интенсивности роста фитопланктона запишем в виде:

$$\mu_F = f(t) \cdot f(I) \cdot f(N) \cdot f(Ph) \cdot f(pH) \cdot f(TM)$$

Основная идея состоит в предположении о том, что при отсутствии лимитации первичной продукции внешними факторами и оптимальных физиологических условиях среды $\mu_F = \mu_{max}$. Раскрывая физический смысл параметра μ_{max} , полагаем что, при описанных выше идеальных условиях, максимальное число делений одной клетки в сутки равно 2, при таком темпе биомасса будет воспроизводиться на 300 % каждые сутки, а значит $\mu_{max} = 4$ сут⁻¹. Это значение принимаем как среднее для различных видов фитопланктона, хотя известно, что некоторые виды, например, диатомовых могут делиться до 4–6 раз в сутки.

Параметр μ_{max} – это максимальная интенсивность роста фитопланктона, которую в уравнении задаем как функцию температуры $f(t)$. Основываясь на теоретических предпосылках, принимаем, что связь между скоростью развития и температурой при оптимальных условиях имеет линейный характер. Если представить куполообразную кривую толерантности, то линия, о которой идет речь, суть аппроксимирующая левую части «купола» от зоны минимума до зоны оптимума. Основной вопрос состоит в нахождении угла наклона этой кривой. Воспользовавшись правилом сумм температур и приняв, что $t_0 = 5$ °C, а

константа $1/S=0.023$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$) $^{-1}$, которая обозначает скорость развития при $t-t_0=1^{\circ}\text{C}$, получим следующую зависимость для μ_{\max} :

$$f(t) = \mu_{\max} = 0.023 \cdot (t - 5),$$

где t – температура в конкретный момент времени.

Видоспецифичность в данном случае можно задать через «условный биологический ноль» t_0 , при котором $\mu=0$, который в свою очередь связан с экологией каждого вида. Так для менее теплолюбивого вида диатомовых водорослей можно принять $t_0=0^{\circ}\text{C}$.

Далее было принято, что фотоингибирование за счет избыточного поступления солнечной радиации не характерно для малых озер гумидной зоны. Следовательно, уравнения с подобным допущением не рассматривались, большинство из них было получено для морских вод. Сильно окрашенные озерные воды с высоким содержанием гуминовых кислот служат хорошим светофильтром, что затрудняет поступление солнечной энергии на глубину. Здесь можно встретить обратную ситуацию – борьбу за световой ресурс, выражающуюся в фотозатенении одних водорослей другими. Также в пользу отказа от фотоингибирования свидетельствует наличие у каждого вида водорослей определенных механизмов для вертикальных миграций, которые вполне уместны в относительно спокойных озерных водах. Это и наличие жгутиков (пиридиневые, эвгленовые), и механизмы снижения общей плотности за счет накопления липидов и замещение тяжелых ионов более легкими, наличие морфологических приспособлений для парения (диатомовые) и использование газовых вакуолей (сине-зеленые).

Таким образом, для описания светозависимости μ_{\max} был сделан выбор в пользу уравнения гиперболы, $f(I)$ соответственно будет равно:

$$f(I) = \mu_{\max} \cdot \frac{I}{K_I + I},$$

где I – освещенность на глубине h ; K_I – константа полунасыщения по освещенности, т.е. такая величина I при которой $\mu=\mu_{\max}/2$.

Для того чтобы задать влияние содержания биогенных элементов на удельную скорость роста фитопланктона воспользуемся наиболее распространенной формулой Моно. Отсюда $f(N)$ и $f(Ph)$ будут соответственно равны:

$$f(N) = \mu_{\max} \cdot \frac{N}{K_N + N},$$

$$f(Ph) = \mu_{\max} \cdot \frac{Ph}{K_{Ph} + Ph}$$

Наиболее «узким местом» здесь является нахождение значений констант полунасыщения K_N и K_{Ph} . Для различных вод как пресных, так и морских имеется большое количество эмпирически установленных значений этих констант, как уже упоминалось выше. В данной же работе воспользуемся стехиометрическим соотношением элементов,

точно известным, правда, только для морских вод и рассчитаем K_N и K_{Ph} , используя значения биогенных элементов и скорости фотосинтеза в каждом озере.

Зависимость μ_F от загрязняющих веществ, в данном случае от содержания в воде тяжелых металлов, было решено задать на основе выводов полученных из эксперимента Т. В. Замараевой и А. А. Рудковой. Экстраполируя полученные в статье закономерности на интересующие нас сочетания температуры воды, pH и содержания тяжелых металлов получили численные зависимости для расчета $f(TM)=f(Hg):f(Pb):f(Cd)$.

Последним изменением на данном этапе было введение параметра $f(pH)$. Идея введения этого фактора в общее уравнение пришла из практики. Для этого, предположили, что такие параметры, как pH и μ обладают обратной зависимостью. Это подтверждается следующими теоретическими предпосылками:

- Почти все эукариотные водоросли предпочитают аммонийный азот нитратному. Соотношение в водном растворе содержания NH_3 , NH_4^+ и недиссоциированного NH_4OH строго зависит от pH . В обоих случаях при возрастании pH содержание NH_4^+ снижается, что опосредованно влияет на снижение скорости роста μ .

- Содержание двуокиси углерода снижается при увеличении pH воды. При $pH=8.5$ количество двуокиси углерода столь незначительно, что практически может не приниматься во внимание. Уменьшение CO_2 замедляет фотосинтез, а следом и скорость роста фитопланктона.

- Отмечена положительная взаимосвязь содержания ионов водорода и оптической плотности воды на определенных длинах волн. При увеличении оптической плотности уменьшается количество поступающего под воду света, что в условиях дефицита света, так же может являться причиной снижения μ .

Эмпирически выведена следующая зависимость:

$$\mu = 1416,9 \cdot e^{-1,4368 \cdot pH}$$

Исходя из предпосылки об экотипах, допускаем, что при среднем значении активной реакции среды $f(pH)$ будет равняться 1, другими словами никак не влиять на максимальную скорость роста. При увеличении или снижении pH относительно среднего значения будет происходить соответственное увеличение или уменьшение функции $f(pH)$, которую рассчитываем по формуле:

$$f(pH) = \frac{\mu}{\mu_{cp}}$$

В данном случае $f(pH)$ может быть как больше, так и меньше единицы, так как она рассчитана не относительно μ_{max} , а относительно μ_{cp} .

Введение даже в таком не строгом виде параметра $f(pH)$ позволит застраховаться от сбоя модели при экстремальном закислении или выщелачивании водоемов.

Следующим этапом был расчет скоростей деструкции органического вещества фито-, зоо- и бактериопланктона:

$$R_F = r_F \cdot F; r_F = \alpha \cdot \mu_F + \Delta F; \alpha = v \cdot \exp(-c \cdot I_0),$$

где ΔF , v , c – эмпирические коэффициенты, I_0 – поступающая на поверхность солнечная радиация;

$$R_Z = r_Z \cdot Z; r_Z = A_2 \cdot (W_Z)^\beta \cdot \exp(C_1 \cdot (T - 20))$$

где A_2 , β , C_1 – эмпирические константы, получаемые из уравнения зависимости скорости дыхания от веса отдельных групп зоопланктона; W_Z – вес тела (мг сух. веса); T – температура воды;

$$R_B = r_B \cdot B; r_B = a / (1 - a) \cdot \mu_B; \mu_B^{max} = a \cdot T^b; \mu = \mu_B^{max} \cdot (0.3 \cdot \ln(D) + 0.7)$$

где a – отношение трат на обмен бактерий к величине валовой бактериальной продукции, a и b – эмпирические константы, T – температура воды, D – содержание детрита в мг сух.веса/л

Суммируя их, находим общую скорость деструкции органического вещества микроскопических членов системы D .

В четвертой главе описаны процедуры идентификации разработанной модели на натуральных данных (рисунок 4) и ее верификации на независимом материале озер Карельского перешейка, полученном из литературных источников (рисунок 5). Проверили сходимость рассчитанных и фактических данных двух показателей: скорости продукции OB и P/D -отношения по следующим статистическим критериям: критерий случайности, критерий 0.674σ и коэффициент корреляции – таблица 2.

Таблица 2 – Сводная таблица статистических оценок разработанной модели продукционно-деструкционных отношений рассчитанной по натурным и литературным данным

Параметр	Кол-во озер	Кол-во значений n	Критерий случайности δ	Критерию 0.674σ удовлетворяют:	Коэффициент корреляции r
$P_{\text{натур}}$	4	84	0.626	71%	0.76
$P/D_{\text{натур}}$	4	84	0.532	70%	0.53
$P_{\text{литер}}$	22	104	0.409	59%	0.75
$P/D_{\text{литер}}$	15	87	0.968	57%	-0.005

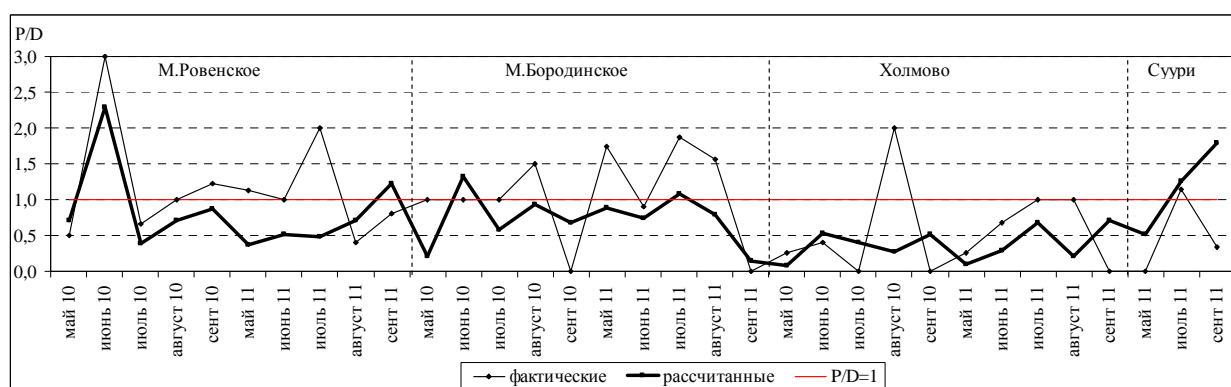


Рисунок 4 – Фактические и рассчитанные с помощью модели значения P/D -отношения в поверхностном горизонте четырех исследованных озер в 2010–2011 гг.

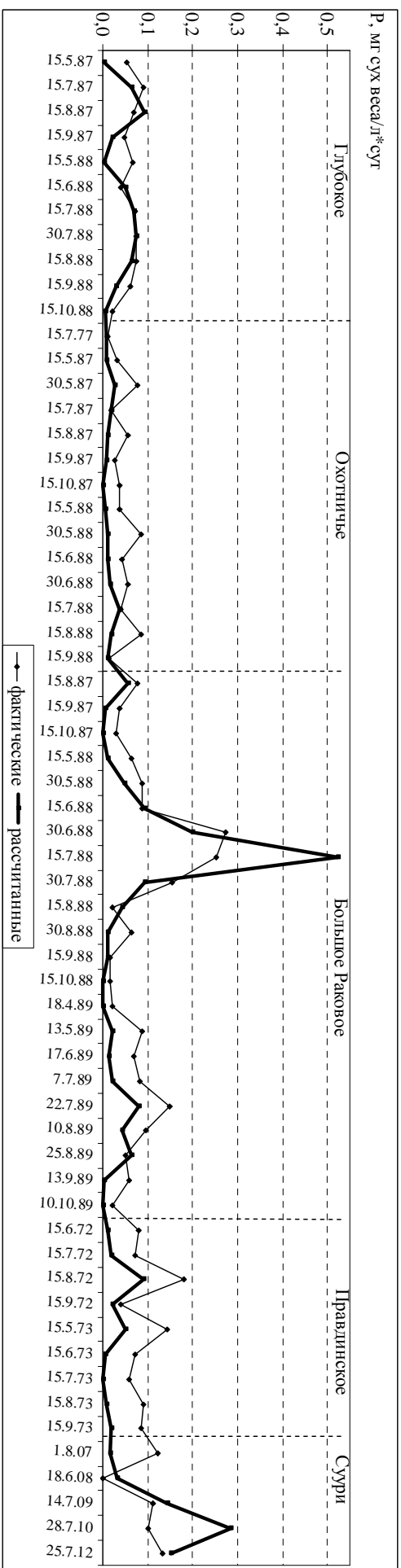
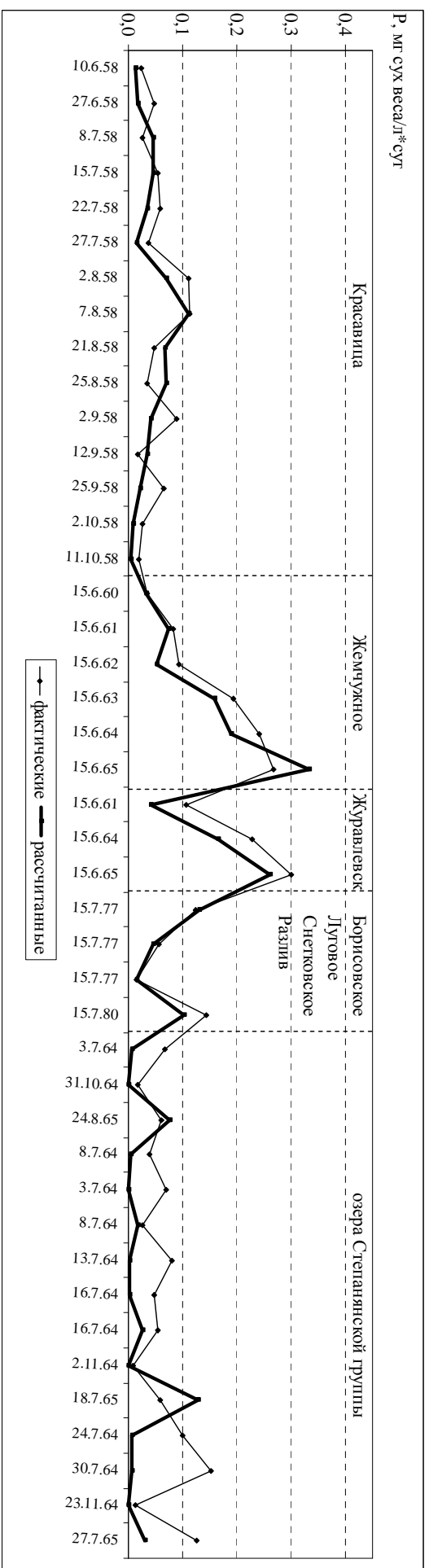


Рисунок 5 – Фактические и рассчитанные с помощью модели значения первичной продукции (мг сух.веса/л*сут) в поверхностном горизонте 22 озер, исследованных в период с 1958 по 2012 гг. (литературные данные, кроме оз. Сури)

На следующем этапе проанализирована временная изменчивость продукционно-деструкционных отношений в водных экосистемах по результатам моделирования внутри года и между годами.

Характер кривых внутригодовых изменений достаточно разнообразен. Встречаются одно-, двух и трехвершинные кривые. Не всегда пик преобладания продукции над деструкцией приходился на середину лета, когда обычно наблюдаются максимальные биомассы фитопланктона в воде. Иногда это случалось в начале или в конце лета.

Отметим максимум P/D -отношения в трех исследованных озерах в начале лета 2010 г. В этот период, когда биогенных элементов в озерах достаточно, на первый план в качестве основных факторов выходят температура и освещенность водных масс. Судя по стабильно-высокой температуре в этот период, это и стало причиной резкого увеличения скорости продукции.

P/D -отношение в оз. Холмово не превышало 1.0 в оба года исследования. Это хорошо согласуется с проведенной ранее типизацией озер по значениям III когда оз. Холмово было отнесено к певично-олиготрофному по классификации Г. Г. Винберга и к олиготрофному типу по классификациям Лайкенса и С. П. Китаева. Интерпретировать расчет внутригодовой изменчивости по литературным данным сложнее. Отметим лишь то, что оз. Охотничье относится авторами исходной статьи к олиготрофному типу по значениям биомассы фитопланктона, хотя, так же как и Холмово, по индексу трофического состояния оно – мезотрофное.

Межгодовые изменения продукционно-деструкционных отношений имеют ярко выраженную тенденцию на увеличение. Проанализировано два водоема за 1960-1965 гг. и 2007-2012 гг., соответственно.

В диссертации рассматриваются эксперименты, проведенные с моделью.

Эксперимент № 1. Для двух гипотетических водоемов олиготрофного и эвтрофного типов рассчитали по пять вариантов изменения ключевых параметров для каждого из четырех гипотетических сценариев, таким образом, что ситуация № 1 соответствовала заданию параметров в естественных условиях, а ситуация № 5 соответствовала заданию экстремальных значений параметров. В эксперимент вошли расчеты по 2 озерам, 4 сценариям, по 5 типам воздействия в каждой. Всего было рассчитано 40 P/D -отношений (таблица 3). Подробное описание сценариев приведено на стр. 134 диссертации.

Известно, что в такой чувствительной системе как малое озеро, малейшее изменение одного параметра влечет скорейшее изменение других, согласно закону внутреннего динамического равновесия. Было интересно оценить влияние изменения каждого параметра на продукционно-деструкционные отношения, поэтому приняли допущение – за сутки после воздействия изменение остальных параметров считали не существенным.

Таблица 3 – Сводная таблица изменений значений входящих параметров в олиго- и эвтрофном озерах при развитии описанных сценариев, по пять ступеней интенсивности в каждом – ситуации

№ сценария	Характер изменения параметра	Олиготрофное озеро					Эвтрофное озеро				
		№ ситуации									
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	$Ph \uparrow$	0.005	0.01	0.015	0.02	0.025	0.051	0.102	0.153	0.204	0.255
	$N \uparrow$	0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
2	$T \uparrow$	23.0	25.0	27.0	29.0	31.0	24.0	26.0	28.0	30.0	32.0
3	$SD \uparrow$	4.0	2.0	1.0	0.5	0.25	1.0	0.75	0.5	0.25	0.15
	Мутность \downarrow	0.5	1.1	2.2	4.3	8.6	2	4	8	16	32
4	$pH \downarrow$	5.6	5.3	5.0	4.7	4.4	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0

Ph , N – содержание фосфора и азота; T – температура воды; SD , M – прозрачность и мутность воды; pH – активная реакция среды.

В таблице 3 представлены значения входящих в модель параметров, заданные для четырех сценариев и для пяти ситуаций в каждом.

Как видно из рисунка 6, не все экологические нарушения приводят к увеличению продукционных свойств водоема. Есть и такие, которые снижают продуктивность экосистемы. Например, ухудшение прозрачности воды или увеличение ее температуры.

И если в случае с ухудшением оптических свойств был получен ожидаемый результат, то в случае с температурой результат – более неожиданный. Ведь априори предполагалось, что при увеличении температуры увеличивается скорость химических реакций и метаболизма, соответственно и рост клеток тоже должен был увеличиваться. Была выявлена увеличивающаяся активность не только фитопланктона, но зоо- и бактериопланктона, что повлекло за собой увеличение трат на обмен этих компонентов биоты. Соответственно в P/D -отношении увеличивался не только числитель, но и знаменатель. Причем, знаменатель увеличился намного больше.

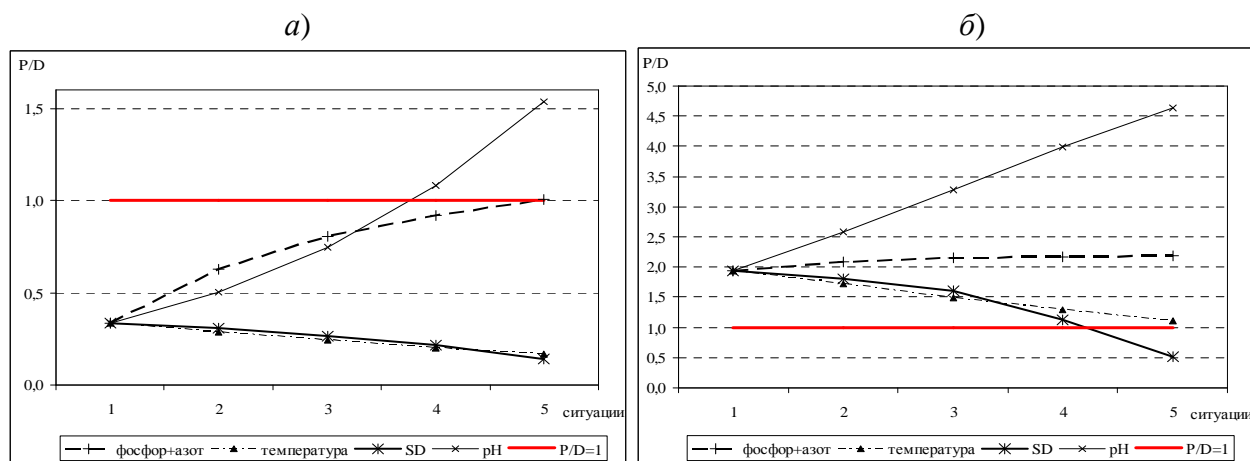


Рисунок 6 – Изменение P/D -отношения при реализации 4-х сценариев в поверхностном горизонте олиготрофного (а) и эвтрофного озера (б)

Рисунок 6б (эвтрофный водоем) иллюстрирует более резкий характер снижения P/D по сравнению с 6а при ухудшении оптических свойств воды. Так при наибольшем изменении этого параметра (ситуация № 5) P/D -отношение уменьшается в 2.5 и 3.9 раза, в олиготрофном и эвтрофном озерах соответственно. Это свидетельствует о том, что в обильном флорой и фауной эвтрофном озере такой фактор, как доступность солнечной радиации, имеет большую силу воздействия на продукционный баланс планктонного сообщества, чем в олиготрофном водоеме.

Под влиянием увеличения температуры воды P/D -отношение снизилось максимально в 2 раза, как в одном, так и в другом озере. В этот момент P/D -кривая эвтрофного озера пересекла прямую со значением $P/D=1$, что характерно для менее трофного класса.

Рассмотрен наиболее распространенный сценарий развития событий – поступление в водоем большого количества биогенных элементов. В обоих озерах эта ситуация приводит к увеличению продукционно-деструкционных отношений за счет увеличения скорости прироста фитопланктона. Однако в этих двух случаях характер кривых сильно различается. Так в наиболее критической ситуации, когда содержание минерального фосфора и азота превышало начальное содержание в воде озера в 5 раз (ситуация № 5) P/D -отношение увеличилось в 3.0 и 1.1 раза, в олиготрофном и эвтрофном озерах соответственно. Как и в случае с прозрачностью, сделан вывод о том, что недостаток или избыток биогенных элементов оказывает более сильное влияние на продукционно-деструкционный баланс в олиготрофном озере, чем в эвтрофном.

Получено, что в каждом из рассмотренных озер факторы, оказывающие наибольшее влияние различны. Так в олиготрофном озере это содержание биогенных элементов, а в эвтрофном озере это доступность солнечной радиации. Это не противоречит широко известному принципу Либиха о том, что фактор, находящийся в дефиците, скорее становится лимитирующим. Хотя полученные выводы были широко известны и без предложенной модели, автор считает подтверждение тривиальных гипотез – положительным аргументом в пользу модели.

При сильном или умеренном закислении озера также наблюдалось увеличение значения P/D -отношений в обоих случаях. В олиготрофном озере при наибольшем снижении pH P/D -отношение становится >1 , что характерно для более продуктивного класса. Здесь отклик P/D -баланса даже сильнее, чем при избытке биогенных элементов. Отметим, что включение pH в модель требует дополнительных исследований.

На следующем этапе рассмотрено совокупное воздействие факторов на P/D -отношение в олиготрофном и эвтрофном водоемах (рисунок 7). Изменения параметров были заданы следующим образом: содержание биогенных элементов \uparrow , мутность \uparrow , SD \downarrow , температура \uparrow , $pH=pH_{cp}$ от первой ситуации к пятой.

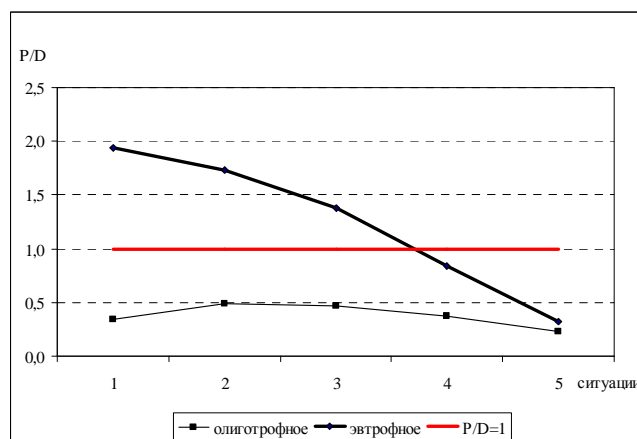


Рисунок 7 – Изменение P/D -отношений в натуральном объединенном сценарии в поверхностном горизонте олиготрофного и эвтрофного озер

Из рисунка видно, что эвтрофное озеро переходит в более низкий класс трофности, а олиготрофное озеро остается в своем классе. Примеры таких озер бедных органическим веществом уже были рассмотрены. Кривая P/D -баланса в мезотрофных и эвтрофных озерах пересекала красную черту от одного до трех раз в год. В связи с этим был сделан вывод о том, что озера отнесенные к мезо- или эвтрофному типу легче переходят в соседний класс трофности, чем олиготрофные озера. Возможно, это зависит еще и от диапазона изменений внешних факторов, так в олиготрофном озере он уже, соответственно и отклик на их изменение менее заметен.

Один из основных выводов состоит в том, что «чисто-эвтрофного» класса не бывает, и даже в гиперэвтрофном озере в некоторые моменты времени $P/D < 1$, а вот «чисто-олиготрофный» тип озер встречается. Рассматривается принадлежность водоема к тому или иному трофическому классу по P/D -отношению в любой момент определения.

Для однозначного отнесения озера к тому или иному трофическому типу в дальнейшем использовались усредненные значения входящих параметров за вегетационный период.

В эксперименте № 2 для оценки гипотетической внутригодовой изменчивости таких параметров как скорость продуцирования органического вещества P и P/D -отношение, произвели их расчет с помощью модели для периода открытой воды в озерах с различным уровнем трофности, олиго-, мезо- и эвтрофного типа. Все расчеты произведены для поверхностного горизонта (≈ 0.1 м) центральной части озера для середины месяца в период с мая по октябрь.

Различия между температурой воды в поверхностном горизонте были заданы следующим образом: с увеличением трофности озера она увеличивалась на 0.5 °C с каждым классом трофности. Так же в эвтрофном озере по сравнению с олиготрофным были заданы более щелочная реакция среды, мутность, содержание биогенных элементов и биомассы всех представителей планктонного сообщества и меньшая прозрачность воды.

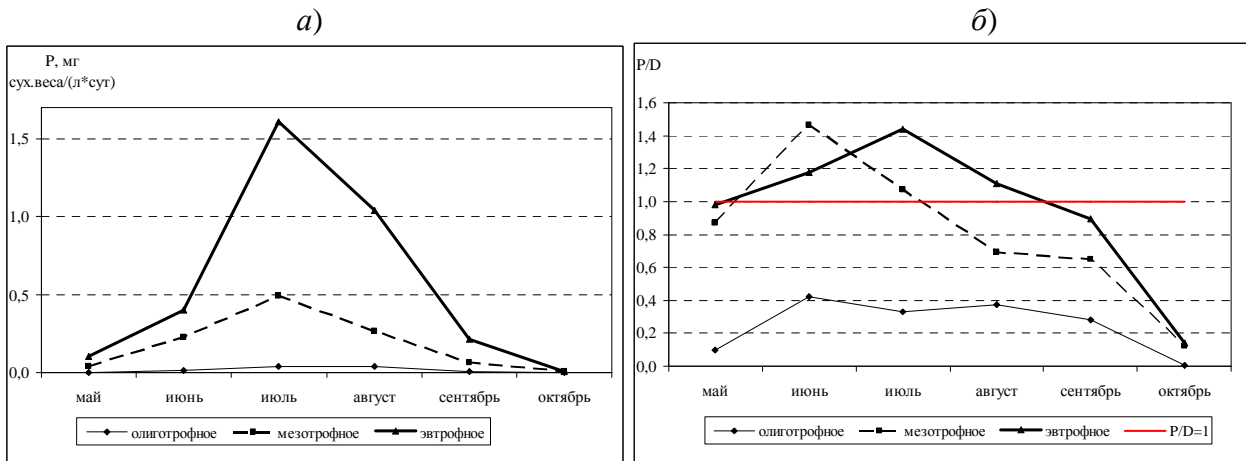


Рисунок 8 – Изменение скорости продуцирования (а) и P/D -отношения (б) в течение периода открытой воды в поверхностном горизонте озер разной трофности

Скорость продуцирования представляет собой во всех трех случаях, с водоемами различной трофности, одновершинную кривую с пиком в июле. По всей видимости, решающую роль для скорости продуцирования здесь играет температура воды, ведь в июле она была максимальной для каждого озера. Конечно, в естественных условиях нет такой прямой зависимости от температуры воды, иногда встречаются двухвершинные или чашеобразные кривые изменений PPP .

Как видно из рисунка 8б кривые изменений P/D -отношений в мезотрофном и эвтрофном водоемах неоднократно пересекают прямую со значением 1, в отличие от олиготрофного озера, где $P/D < 1$ на протяжении всего периода открытой воды. Другими словами в этих двух озерах в течение года P/D -баланс может быть как положительным, так и отрицательным.

Отмечены диапазоны изменения этого параметра. Для олиготрофного озера они гораздо уже и составляют 0.4, тогда как в мезотрофном и эвтрофном озерах они составляют примерно 1.2.

В общем виде изменения P/D -отношений представляют собой куполообразную одну либо двухвершинную (график олиготрофного озера) кривую с минимумами в конце вегетационного периода.

Предложены дополнительные динамические и показательные критерии, рассчитываемые с помощью разработанной модели.

На основе P/D -отношения была количественно оценена устойчивость экосистемы малых озер к антропогенному эвтрофированию. Проведена попытка разделить естественный и антропогенный вклад в процесс эвтрофирования. Например, грубо рассчитано, с помощью линейной зависимости, ускорение с которым нарастало естественное эвтрофирование водоемов. Оно составило 0.0004 и 0.002 мг сух.веса/л-год², для олиго- и эвтрофного озера

соответственно, тогда как в водоемах, подверженных антропогенному воздействию, скорость продуцирования ежегодно возрастает минимально на 0.06 мг сух.веса/л-год.

Получена оценочная шкала способности водоемов различных типов гумозности (рисунки 9 и 10) к самоочищению, рассчитанная с помощью интегральных P/D -отношений ($\int P/D$).

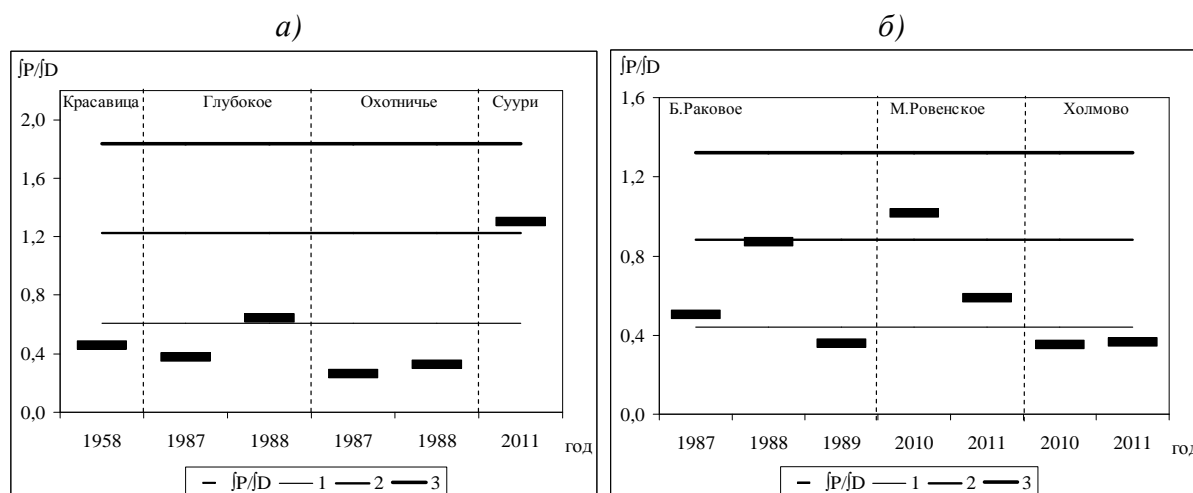


Рисунок 9 – Значения показателя $\int P/D$ для олиго-, мезогумозных (а) и в мезополигумозных (б) озер с границами кратности насыщения автохтонным органическим веществом относительно скорости его деструкции в вегетационный период

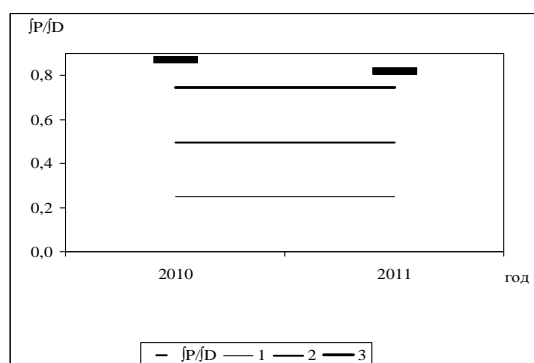


Рисунок 10 – Значения показателя $\int P/D$ для полигумозного оз. М. Бородинское с границами кратности насыщения автохтонным органическим веществом относительно скорости его деструкции в вегетационный период

«Злокачественным» предложено считать трехкратное и более превышение скорости продуцирования органического вещества над скоростью его утилизации планктонным сообществом, проинтегрированные за период открытой воды в водоеме.

По результатам работы в целом, представлены обобщенные выводы:

1. Проведено исследование состава и свойств водных экосистем четырех озер Карельского перешейка в 2010-2012 гг. Обобщен литературный материал по 40 озерам Карельского перешейка, которые были исследованы в период 1958-2012 гг. Создана база

данных по элементам режимов, показателям химического и биологического состава и физических свойств воды малых озер Карельского перешейка. Введен ряд определений:

- P/D -отношение – отношение скорости продуцирования органического вещества фитопланктоном к скорости его разрушения планктонным сообществом за определенный период во всем водоеме или его части;
- P/D -баланс – результат анализа P/D -отношения. Например, отрицательным P/D -баланс будет считаться, когда $P/D < 1$ за определенный период времени;
- P/D -режим – закономерное проявление во времени (и пространстве) изменений элементов продукционно-деструкционных отношений (P , D , P/D).

Внутригодовые и межгодовые изменения продукционно-деструкционных отношений в большей степени зависят от метеорологических факторов, тогда как общий уровень продуктивности озера зависит от физико-географических условий и характера водосбора;

2. Разработана модель продукционно-деструкционного баланса для планктонного сообщества озерной экосистемы в период открытой воды. Эта модель была идентифицирована на натуральных данных и прошла верификацию по данным из литературных источников. На этапе идентификации модель P/D -отношения оказалась эффективной согласно следующим статистическим критериям: критерий случайности, критерий 0.674σ и коэффициент корреляции. Около 70 % значений были предсказаны с удовлетворительной точностью. На этапе верификации эффективным согласно тем же статистическим критериям оказался только расчет скорости продуцирования OB ($P_{вал}$).

3. На основе экспериментов с моделью получены новые знания о формировании продукционно-деструкционных отношений в водоемах различной трофности. В олиготрофных водоемах выявлена характерная особенность P/D -баланса, суть он является отрицательным при всех заданных сочетаниях факторов, на примере оз. Холмово, Охотничье и Красавица. Диапазон изменения P/D -баланса в этих озерах был значительно уже, чем в мезо- и эвтрофных водоемах. Постоянное положительное значение P/D -баланса в течение года не встречалось ни в мезо- ни в эвтрофных водоемах, для них характерна одно-, двух- или трехвершинная кривая, которая неоднократно пересекает прямую $P/D=1$ в течение вегетационного сезона;

4. На основе представленной модели предложен комплекс критериев оценки состояния озерной экосистемы: $P_{вал}/R_F$, $P_{вал}/R_Z$, $P_{вал}/R_B$, $P_{чист}/D$, P/B , D/B . Их характерной особенностью является принадлежность к группе динамических критериев, характеризующих скорости массообмена в водной экосистеме. Анализ изменения показателей скоростей обменных процессов выявил, что для сохранения трофического состояния и P/D -режима водной экосистеме необходимо поступление аллохтонного органического вещества с водосбора;

5. По результатам моделирования выявлено, что в олиготрофном озере основным фактором, лимитирующим первичную продукцию, является недостаток биогенных элементов, а в эвтрофном озере – недостаток освещенности водной толщи. Это удалось установить на основе расчета показательных функций, отражающих влияние факторов среды на продуцирование *OB* в экосистеме, таких как $1/f(I)$, $1/f(Ph)$, $1/f(N)$, которые показывают во сколько раз недостаток того или иного ресурса снижает удельную скорость роста фитопланктона. К такому же выводу пришли при проведении специальных экспериментов по изолированному воздействию факторов среды в олиго- и эвтрофном озерах;

6. Кроме экологического мониторинга модель может быть использована и в геоэкологических изысканиях, так как P/D -отношение является хорошим маркером устойчивости экосистемы, как к естественным, так и антропогенным изменениям окружающей среды, приводящим к «злокачественному увеличению первичной продукции»;

7. Предложена новая шкала интерпретации отношения продукционных и деструкционных процессов, основанная на кратности скорости производства органического вещества и скорости его разрушения, проинтегрированных для периода открытой воды в каждый год исследования. «Злокачественным» рекомендовано считать 3-х кратное превышение интегральной продукции над интегральной деструкцией, в котором зачастую не малую роль играет антропогенное воздействие на водную экосистему.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в рецензируемых источниках **по списку ВАК:**

1. Степанова, А. Б. Гидрохимические особенности малых озер о. Валаам / А. Б. Степанова, **Г. Ф. Шарафутдинова**, Е. Ю. Воякина // Ученые записки РГГМУ. – СПб.: РГГМУ, 2010. – № 12. – С. 97–109.

2. **Шарафутдинова, Г. Ф.** Первичная продукция, как важный параметр мониторинга поверхностных вод, на примере озер Карельского перешейка / Г. Ф. Шарафутдинова // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. – СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2012. – №153(2). – С. 129–134.

И другие:

3. Степанова, А.Б. Подходы к фоновому мониторингу малых островных озер, на примере разнотипных водоемов Валаамского архипелага / А. Б. Степанова, **Г. Ф. Шарафутдинова**, Е. Ю. Воякина, Н. В. Зуева // IV научная конференция «Проблемы мониторинга природной среды Соловецкого архипелага», 8-11 дек. 2009 г. : материалы. – Архангельск, 2009. – С. 62–63.

4. **Шарафутдинова, Г. Ф.** Влияние освещенности на продуцирование органического вещества в озерах о. Валаам / Г. Ф. Шарафутдинова // XIV Съезда РГО, 11–14 дек. 2010 г. : материалы. – СПб. – электронная публикация.

5. Дмитриев, В. В. Оценка экологического состояния качества воды, трофности и устойчивости водных объектов Карельского Приладожья по материалам летних наблюдений 2007–2010 гг. / В. В. Дмитриев, В. Е. Панов, **Г. Ф. Шарафутдинова**, Н. Н. Огородникова, Е. Н. Оверченко, Н. Е. Котова // Международная конференция «География в системе наук о земле: современные проблемы науки и образования» : [посвящ. 165–летию создания РГО и 85–летию организации географического факультета в СПбГУ: материалы]. – СПб.: СПбГУ, 2011. – С. 172–181.

6. **Шарафутдинова, Г. Ф.** Влияние освещенности на продуцирование органического вещества в малых озерах / Г. Ф. Шарафутдинова // Международная конференция «География в системе наук о земле: современные проблемы науки и образования» : [посвящ. 165–летию создания РГО и 85–летию организации географического факультета в СПбГУ: материалы]. – СПб.: СПбГУ, 2011. – С. 257–264.

7. **Шарафутдинова, Г. Ф.** Влияние биогенных элементов на первичную продукцию малых озер Карельского перешейка / Г. Ф. Шарафутдинова // Международная конференция «Современные проблемы географии и геоэкологии» : [посвящ. 90–летию почетного профессора СПбГУ, д.г.н. А.Г. Исаченко: материалы]. – СПб.: СПбГУ, 2012. – С. 223–233.

8. Дмитриев, В. В. Экологическое состояние водных объектов Карельского приладожья по результатам экспедиционных исследований 2011 года и его сравнение с ретроспективными данными / В. В. Дмитриев, В. Е. Панов, **Г. Ф. Шарафутдинова**, С. Н. Бурцев, О. Н. Боброва, О. А. Буршева, А. А. Евдокимов, Г. С. Зезюльчик, В. В. Кашина // Международная конференция «Современные проблемы географии и геоэкологии» : [посвящ. 90–летию почетного профессора СПбГУ, д.г.н. А.Г. Исаченко: материалы]. – СПб.: СПбГУ, 2012. – С. 201–214.

9. **Шарафутдинова, Г. Ф.** Мониторинговые наблюдения первичной продукции фитопланктона в озерах Карельского перешейка / Г. Ф. Шарафутдинова // Международная молодежная конференция «Науки о Земле и цивилизация» : сб. науч. тр. – СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2012. – С. 242–246.

10. Дмитриев, В. В. Экологическое состояние водных объектов Карельского Приладожья по результатам исследования 2012 г. и его сравнение с ретроспективными данными / В. В. Дмитриев, С. А. Малявин, **Г. Ф. Шарафутдинова**, С. Н. Бурцев, А. Д. Демидова, Л. С. Курочкина, Г. Д. Третьякова, П. В. Николаев, А. Ю. Реготов, И. К. Резцов, В. Ю. Товмач – подписано в печать.