



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

**На тему «Оценка вклада весеннего и летнего цветения
фитопланктона в годовую первичную продукцию
Онежского озера на основе математического
моделирования»**

Исполнитель _____ Харина Алёна Игоревна

Руководитель _____ кандидат географических наук

_____ Хаймина Ольга Владимировна

Научный консультант _____ кандидат географических наук, с.н.с. Лаборатории
моделирования океанских биогеохимических циклов
Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН

_____ Исаев Алексей Владимирович

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук

Хаймина Ольга Владимировна

«10» 06 2025

Санкт-Петербург

2025

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1 Современное состояние Онежского озера и применение математического моделирования для оценки его изменений	7
1.1 Общая характеристика водоема. Геологическое строение и рельеф ...	7
1.2 Климат и гидрологический режим	10
1.3 Изменчивость гидрохимических и гидробиологических показателей ..	12
1.4 Источники загрязнения и качество вод.....	14
2 Модификация математической модели SPBEM-2 для Онежского озера с учетом двух групп диатомовых водорослей	19
2.1 Структуризация массовых видов диатомовых водорослей Онежского озера	19
2.3 Краевые условия модели	29
2.4 Численная реализация модели	31
3 Результаты моделирования биогеохимических циклов Онежского озера с учетом трех видов фитопланктона	33
3.1 Метеорологические условия выполнения численных экспериментов	33
3.2 Сезонная изменчивость компонентов биогеохимического цикла Онежского озера	38
3.3 Оценка вклада в первичную продукцию летних диатомовых водорослей	54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	58
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Программный код модуля осреднения данных в программном пакете Python.	63
ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Результаты моделирования для лимнических районов Онежского озера	65

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- SPBEM-2 — Санкт-Петербургская модель эвтрофикации Балтийского моря
- ОФ — общий фосфор
- ОА — общий азот
- LDOP — лабильный растворенный органический фосфор
- RDOP — стойкий растворенный органический фосфор
- PO_4^{3-} — ион фосфата
- PP1 — чистая первичная продукция летних диатомовых водорослей
- PP2 — чистая первичная продукция весенних диатомовых водорослей
- PP3 — чистая первичная продукция недиатомовых водорослей
- VP — поглощение фосфата автотрофными организмами
- WDLP — минерализация лабильного растворенного органического фосфора
- WDP — деструкция детрита с высвобождением фосфора
- WDRP — фототрансформация стойкого растворенного органического фосфора в лабильный
- A1 — биомасса весенних диатомовых водорослей
- A2 — биомасса летних диатомовых водорослей
- A3 — биомасса недиатомовых водорослей
- DO — растворенный кислород
- Chl-a — хлорофилл а
- DIN — растворенный неорганический азот
- DON — растворенный органический азот
- DOP — растворенный органический фосфор
- PP — суммарная первичная продукция
- ERA-Interim — набор данных повторного анализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды
- MITgcm — Массачусетская модель общей циркуляции (Massachusetts Institute of Technology general circulation model)

ТКЕ — турбулентная кинетическая энергия (Turbulent Kinetic Energy)
GGL90 — схема параметризации вертикальной турбулентности (Generic Length Scale turbulence closure)
SeaIce — модуль моделирования ледового покрова
drF — толщина ячейки по вертикали (в модели)
rA — площадь ячейки (в модели)
ПДК — предельно допустимая концентрация
БПК5 — биохимическое потребление кислорода за 5 суток
ХПК — химическое потребление кислорода
ГЭС — гидроэлектростанция

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы исследование первичной продукции крупных пресноводных экосистем приобретает особую значимость в связи с возрастающим антропогенным и климатическим воздействием на водоемы. Онежское озеро, являющееся одним из крупнейших пресноводных водоемов Европы, отличается сложными биогеохимическими процессами и высокой чувствительностью к внешним изменениям [1]. Сезонные вспышки фитопланктона, особенно весеннее и летнее цветение, формируют основу годовой первичной продукции и оказывают значительное влияние на структуру пищевых цепей и общее экологическое состояние озера [2].

В условиях интенсивного хозяйственного использования, включающего водоснабжение, судоходство и сброс сточных вод, а также под воздействием суровых климатических факторов, экосистема Онежского озера испытывает существенные нагрузки, что приводит к локальному ухудшению качества воды и увеличивает риск эвтрофикации [3].

Для эффективного мониторинга и управления состоянием озера необходимы современные методы анализа, способные учитывать пространственно-временную динамику биогеохимических процессов и разнообразие фитопланктонных сообществ. Примером таких инструментов может служить математическое моделирование, а именно адаптация и применение модели SPBEM-2 для комплексного анализа влияния антропогенных и климатических факторов на экосистему озера [2].

Целью данной работы является оценка вклада весеннего и летнего цветения фитопланктона в годовую первичную продукцию Онежского озера на основе математического моделирования.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- подготовка краткой характеристики современного состояния Онежского озера и применения математического моделирования для оценки его изменений;
- классификация диатомового фитопланктона по размерам и биологическим характеристикам для корректного включения в модель;
- модификация математической модели биогеохимических циклов SPBEM-2 для Онежского озера с учетом трех ключевых групп фитопланктона для более адекватного воспроизведения продукционных процессов;
- выбор года с условиями, близкими к средним многолетним для 2006-2020 гг., на основе анализа метеорологических данных для задания атмосферного форсинга;
- визуализация результатов моделирования, анализ расчетных данных для оценки вклада весеннего и летнего цветения фитопланктона в годовую первичную продукцию и выявления влияния внешних факторов.

Ожидается, что интеграция в модель группы диатомовых водорослей «small» повысит точность прогнозов и приблизит результаты к реальным условиям среды, что создаст фундамент для разработки эффективных мер по мониторингу и управлению состоянием Онежского озера.

1 Современное состояние Онежского озера и применение математического моделирования для оценки его изменений

1.1 Общая характеристика водоема. Геологическое строение и рельеф

Онежское озеро (рисунок 1.1) является вторым по величине пресным водоемом в Европе. Озеро находится на северо-западе европейской части России на территории 3-х регионов: республика Карелия, Ленинградская и Вологодская области.

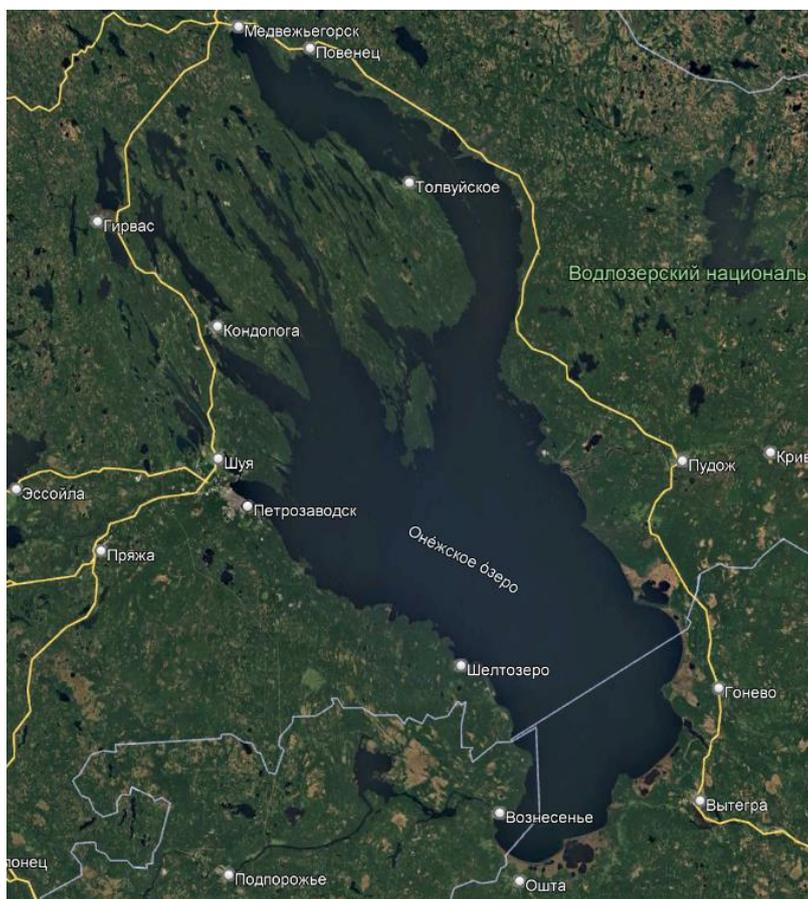


Рисунок 1.1 — Онежское озеро (изображение: Google Earth, данные © Google)

Площадь зеркала составляет 9720 км², длина – около 250 км, ширина – до 96 км, средняя глубина – 30 м, наибольшая – 127 м [4]. Озеро относится к водосбору Балтийского моря и имеет ледниковое происхождение.

Гидрографическую сеть бассейна Онежского озера образуют около 6 тысяч рек и 9 тысяч озер. Единственным стоком является река Свирь, которая несет воды в Ладожское озеро [4, 5].

Геологическое строение и рельеф дна Онежского озера обусловлены сочетанием тектонических процессов и четвертичного оледенения, определивших современную структуру котловины и характер отложений.

В основании котловины залегает кристаллический фундамент, сложенный докембрийскими породами (граниты, гнейсы, диабазы), перекрытый толщей палеозойских осадочных отложений (песчаники, глины, известняки) [6]. Тектонические движения предопределили общую структуру котловины, а ледниковая эрозия и аккумуляция в плейстоцене сформировали современный рельеф дна [7].

Рельеф дна Онежского озера характеризуется значительной неоднородностью. Выделяются следующие основные типы рельефа:

- структурно-денудационный рельеф северной части озера, где кристаллические породы выходят на поверхность или перекрыты маломощным слоем четвертичных отложений, образуя шхерный рельеф с многочисленными заливами и островами [6];
- аккумулятивные равнины центральной и южной частей озера, сложенные ледниково-озерными отложениями (ленточные глины) мощностью до 40 м [7];
- моренные холмисто-равнинные участки в восточной и южной частях побережья [6].

Наиболее расчлененный рельеф характерен для северной части озера, где распространены формы, образованные ледниковой экзарацией и тектоническими движениями (рисунок 1.2) [6]. В центральной и южной частях преобладают аккумулятивные равнины с небольшими перепадами высот,

сформированные в результате накопления приледниковых осадков [8]. На дне встречаются луды (мелководные каменистые мели), сельги (глубоководные повышения дна), подводные кряжи и впадины [7].

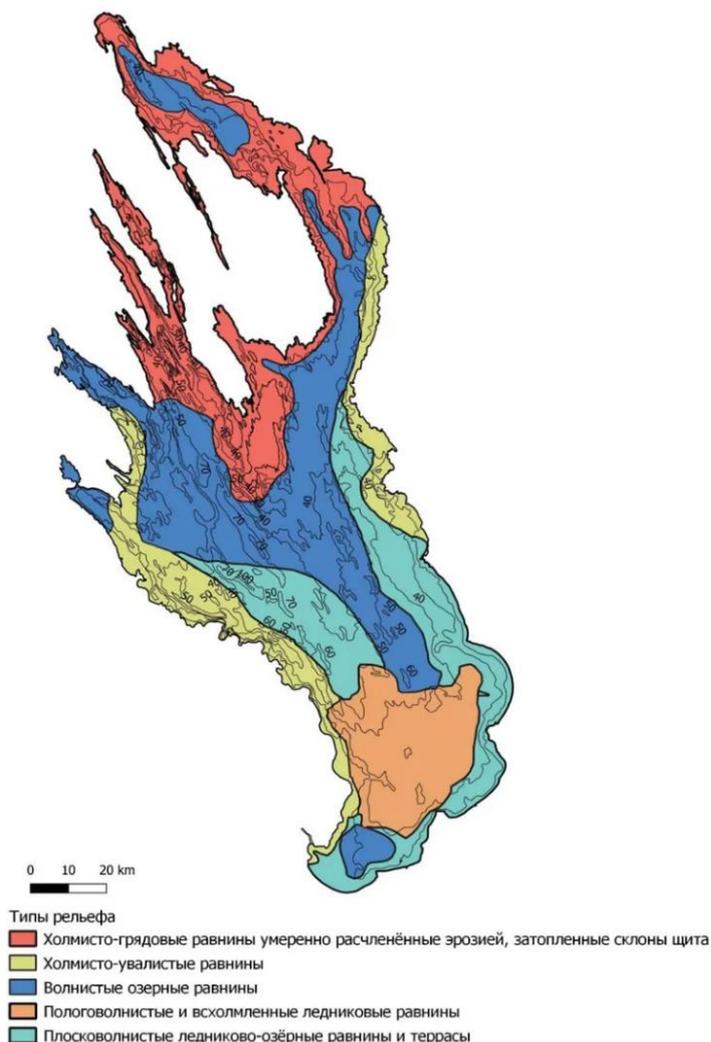


Рисунок 1.2 — Геоморфологическая схема Онежского озера [7]

Грунты дна также отличаются разнообразием: от каменистых и песчаных на мелководьях до илистых в глубоководных районах [7]. Каменистые грунты преобладают в прибрежной полосе северной части озера, песчаные и песчано-гравийные отложения распространены на мелководьях, а илистые отложения занимают около 70 % площади дна в центральной и южной частях [7].

Таким образом, геологическое строение и рельеф дна Онежского озера являются результатом длительной и сложной истории развития, включающей тектонические движения, ледниковую эрозию и аккумуляцию, а также современные процессы осадконакопления.

1.2 Климат и гидрологический режим

Акватория Онежского озера расположена в зоне с умеренным климатом, который представляет собой переходный тип между морским и континентальным. Средние температуры воздуха в январе составляют $-11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом абсолютный минимум зафиксирован на уровне $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 1940 году. В июле средняя температура достигает $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, а абсолютный максимум составляет $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, зарегистрированный в 1972 году [5].

Замерзание озера происходит в прибрежных зонах и заливах в конце ноября — декабре, тогда как центральная часть покрывается льдом в середине января. Толщина льда может достигать 1 м, однако в некоторые годы наблюдается неполное покрытие льдом. В конце апреля происходит вскрытие устьев притоков, а открытая часть озера освобождается от льда в мае [4].

Весной (в мае — июне) и осенью (в октябре — ноябре) в Онежском озере формируется термический бар — гидрофронт с температурой воды максимальной плотности около $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, который отделяет прогретые весной и охлажденные осенью воды мелководных зон от глубоководной части озера. Летом наблюдается вертикальная термическая стратификация, при этом толщина верхнего прогретого слоя составляет около 10–20 м. Наивысшая температура воды в поверхностном слое отмечается в августе: в открытой части озера она достигает $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в заливах — до $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. В придонных слоях температура воды колеблется от $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой до $4\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом [4].

Для Онежского озера характерна выраженная асимметрия бассейна, а также значительные различия в густоте речной и озерной сети между его

южной и северной частями. Основная часть водосборного бассейна сосредоточена в северной части [4].

Гидрографическая сеть бассейна, как уже отмечалось выше, включает 6 765 рек, среди которых наиболее крупные — Шуя, Суна, Водла, Вытегра и Андома; сток этих рек составляет около 60% от общего притока в озеро. Среднегодовой сток составляет приблизительно 18 км³. Из Онежского озера вытекает река Свирь, впадающая в Ладожское озеро; сток из озера регулируется Верхне-Свирской ГЭС [4].

Реки обеспечивают до 75 % приходной части водного баланса, тогда как атмосферные осадки составляют 25 %. Расходная часть водного баланса включает 85 % стока из озера по реке Свирь и 15 % на испарение с водной поверхности (рисунок 1.3).

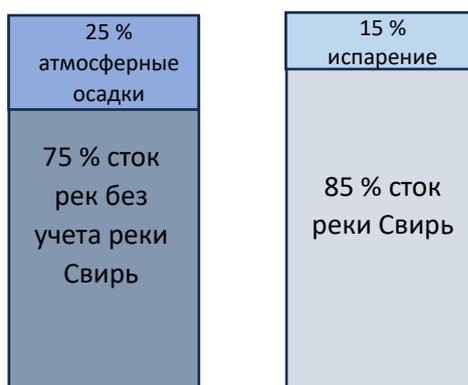


Рисунок 1.3 Водный баланс Онежского озера

Наивысшие уровни воды в озере наблюдаются в период с июня по август, тогда как низкие уровни фиксируются в марте и апреле. Абсолютный размах колебаний уровня составляет около 190 см, а среднее значение колебаний в течение года — около 50 см. [4]

Прозрачность воды достигает 9 м, а у берегов варьируется от 1 до 4 м. Летом преобладает циркуляция вод (течения) циклонического характера (против часовой стрелки). Средние скорости течений в поверхностном слое

составляют 5 см/с, с возможными пиками до 20–30 см/с (в редких случаях до 100 см/с), тогда как у дна скорость не превышает 2–3 см/с. Зимой подо льдом наблюдаются слабые течения со скоростью около 1 см/с, которые заметны только в устьях рек. Высота волн на поверхности иногда достигает 2–5 м; штормовые нагоны могут быть разрушительными (например, в ноябре 2008 года была разрушена набережная города Петрозаводск). Высота внутренних волн может достигать до 10 м [4].

1.3 Изменчивость гидрохимических и гидробиологических показателей

Химический состав воды Онежского озера формируется преимущественно за счет приточных вод с водосбора, а также атмосферных осадков, подземного и антропогенного стока. Несмотря на возрастающее антропогенное воздействие, воды озера сохраняют олиготрофный характер и высокое качество в большинстве его районов [4].

Бассейн Онежского озера представлен труднорастворимыми архейско-протерозойскими породами, что обуславливает низкую минерализацию как притоков, так и самого озера. Онежское озеро является одним из наименее минерализованных водоемов мира, с общей минерализацией воды в диапазоне 39–46 мг/л. Средняя концентрация фосфора составляет 10–14 мкг/л, общего азота — 0,52–0,65 мг/л, а кремния — 0,3–0,5 мг/л [4]. Абсолютное содержание растворенного кислорода варьируется от 10,4 до 14,4 мг/л [4].

Подо льдом в поверхностном слое концентрация кислорода колеблется между 11 и 14 мг/л, в придонном слое достигает 13 мг/л. Летом содержание кислорода на поверхности и у дна составляет около 13 мг/л, однако в районах влияния сточных вод городов у дна уровень кислорода снижается до 3–7 мг/л. Онежское озеро характеризуется олиготрофным состоянием и низкой продуктивностью, что свидетельствует о высоком качестве вод. Процесс антропогенного эвтрофирования находится на начальной стадии и наиболее

заметен в Кондопожской и Петрозаводской губах, а также в верхней части Повенецкого залива [4].

Гидрохимические исследования последних лет показывают, что вода Онежского озера характеризуется высоким уровнем насыщения кислородом и рН, что благоприятно для водной биоты. Однако в некоторых районах, особенно в заливах, наблюдается повышение содержания гумусовых веществ, железа и фосфора, что связано с поступлением аллохтонного органического вещества с речным стоком и антропогенным воздействием. Так, в Петрозаводской губе с 1990-х годов отмечается рост цветности воды, концентраций взвешенных веществ, общего железа и фосфора, что сопровождается изменениями карбонатной системы и снижением рН с 7,22 до 7,12 ед. рН, а также уменьшением насыщения кислородом с 101 % до 92 % [9].

В зимний период в Кондопожской губе, где расположены форелевые хозяйства, выявлен дефицит растворенного кислорода (до 0,8 мг/л) и повышенное содержание аммония и минерального фосфора, сопоставимое с уровнем загрязнения сточными водами целлюлозно-бумажного комбината. В центральной части залива наблюдаются признаки эвтрофирования, что подтверждается увеличением содержания общего фосфора и интенсивным развитием фитопланктона [10].

Основными факторами, влияющими на гидрохимический режим Онежского озера, являются климатические изменения, речной сток с высоким содержанием аллохтонного органического вещества и антропогенное воздействие [11].

В настоящее время фитопланктон Онежского озера представлен 431 видом и разновидностями водорослей из 7 систематических групп. Среднее содержание хлорофилла в фитопланктоне открытой части Онежского озера составляет 14 мкг/л, в то время как в заливах этот показатель варьируется от 1,9 до 3,5 мкг/л [4]. Высшие водные растения занимают лишь 0,2% акватории озера. В зоопланктоне зарегистрировано 202 вида организмов, из которых 90 относятся к ракообразным и 112 — к коловраткам. Донные

биотопы населены 530 видами беспозвоночных, из которых около 80% встречаются в прибрежных зонах озера, с доминированием олигохет. На илах обитают реликтовые ракообразные. Средняя биомасса бентоса составляет от 1,1 до 1,5 г/м² [4].

В Онежском озере обитает 47 видов рыб, из которых 16 имеют промысловое значение, включая ряпушку, корюшку, судака, налима, леща, окуня, щуку, сига и лосося. Некоторые виды рыб переходят в категорию редких и исчезающих; например, атлантический осетр больше не встречается в этом водоеме, а озерно-речные сиви утратили свое промысловое значение [4].

1.4 Источники загрязнения и качество вод

Источники загрязнения и качество вод Онежского озера характеризуются сложным взаимодействием природных и антропогенных факторов. Несмотря на то, что около 90 % акватории озера сохраняют высокое качество воды и первозданную чистоту, отдельные районы испытывают значительное загрязнение, охватывающее около 4 % площади водоема, что связано с локальными антропогенными нагрузками [12].

Основными источниками загрязнения являются сточные воды промышленных предприятий и населенных пунктов, расположенных вблизи озера, в частности в районах Кондопоги, Медвежьегорска, Петрозаводска и Вытегры. Здесь наблюдается повышенная нагрузка на экосистему, связанная с промышленным и хозяйственным использованием ресурсов, что отражается на качестве воды [13]. В водах прибрежных районов отмечается рост концентраций органического вещества, взвешенных частиц, железа и фосфора, что связано как с природным поступлением аллохтонного органического вещества, так и с антропогенным воздействием [14].

В частности, Кондопожская губа озера подвержена влиянию сточных вод целлюлозно-бумажного комбината и отходов форелевых хозяйств, что приводит к локальному повышению уровня эвтрофирования. Здесь

фиксируется увеличение содержания общего фосфора, аммония и снижение концентрации растворенного кислорода, что негативно сказывается на состоянии водной биоты [14]. В то же время, в большинстве районов озера сохраняется олиготрофный статус с низким уровнем сапрофитных бактерий и высоким насыщением кислородом, что свидетельствует о хорошем экологическом состоянии водоема [14].

Главным источником водоснабжения г. Петрозаводск является Петрозаводская губа Онежского озера. К основным источникам ее загрязнения относятся недостаточно очищенные стоки предприятий, в том числе коммунального хозяйства города, атмосферные осадки. Наибольший вклад в загрязнение озера вносят сточные воды предприятий пищевой промышленности, транспорт, судоходство, загрязнение снежного покрова нефтепродуктами, которые весной с поверхностным стоком попадают в губу. В силу высокой проточности возможности экосистемы Петрозаводской губы к самоочищению довольно высоки, что пока позволяет ей выдерживать значительную антропогенную нагрузку [15]. К определяющим загрязненность в 2023 г., как и в предыдущие годы, относились органические вещества (по ХПК), которые изменялись в среднем за год в пределах 24,4-43,3 мг/л, и соединения железа — 1-4 ПДК. Среднегодовые концентрации остальных загрязняющих веществ в целом для Петрозаводской губы были ниже ПДК. Превысившие ПДК концентрации легкоокисляемых органических веществ (по БПК₅) до 2,19 и 2,76 мг/л были отмечены в районе устьев рр. Лососинка и Сельская Речка. В районе пристани п. Соломенное и устья р. Неглинка обнаруживали нефтепродукты в концентрациях до 1,4 и 3 ПДК соответственно. Кислородный режим был удовлетворительным. Вода озера в створах Петрозаводской губы в 2023 г. оценивалась как "слабо загрязненная" и соответствовала 2-му классу качества [15].

В условиях возрастающей антропогенной нагрузки и изменений климата для рационального использования ресурсов озера и сохранения качества его вод, а также для прогнозирования изменений экологического состояния

водоема необходимы современные методы анализа, способные учитывать пространственно-временную динамику биогеохимических процессов и разнообразие фитопланктонных сообществ. Одним из таких инструментов является математическое моделирование.

1.5 Математическое моделирование, как инструмент анализа и прогноза состояния экосистемы озера

Математические модели в настоящее время активно применяются для анализа и прогноза состояния экосистем озер. Их использование позволяет исследовать изменения численности, структуры и взаимодействия популяций и сообществ гидробионтов, оценивать химические и биохимические процессы, а также прогнозировать последствия антропогенных и климатических изменений для водоемов различного типа [16]. Среди наиболее известных и широко используемых моделей озерных экосистем можно выделить модель Волленвейдера, предназначенную для оценки круговорота фосфора и прогноза эвтрофикации, модель SALMO для анализа динамики фитопланктона и биогенных элементов, а также трехмерные комплексы DELFT3D-ECO и DYRESM-MYL2, которые позволяют учитывать пространственную неоднородность и стратификацию водной толщи [17].

Особого внимания заслуживает Санкт-Петербургская модель эвтрофикации (SPBEM), которая изначально была разработана для Балтийского моря, но впоследствии была успешно адаптирована и применяется для анализа и прогноза состояния крупнейших пресноводных озер России — Ладожского и Онежского [2, 18-20]. SPBEM-2 (St. Petersburg Baltic Eutrophication Model) представляет собой сопряженную трехмерную гидродинамико-биогеохимическую модель, которая доказала свою эффективность в ретроспективных прогнозах и сценариях климатических изменений, а также при оценке снижения биогенной нагрузки на Балтийское море. В основе модели лежит описание циклов азота и фосфора в водной

толще и донных отложениях, что позволяет использовать ее как в морских азот-лимитированных системах, так и в пресноводных фосфор-лимитированных экосистемах [19, 21].

Модель SPBEM-2 состоит из двух основных модулей: биогеохимического и гидродинамического. Биогеохимический модуль описывает циклы азота, фосфора и кремния в толще воды и донных отложениях (рисунок 1.4 а). Однако для условий Онежского озера цикл кремния исключен, поскольку кремний не является лимитирующим элементом для фитопланктона в этом пресноводном водоеме (рисунок 1.4 б) [2].

Учитывая ограниченное содержание фосфора и низкую способность к азотфиксации в озере, процесс азотфиксации и диатомовые цианобактерии исключены из модели (рисунок 1.4 б). Автотрофы представлены двумя функциональными группами: диатомовыми и недиатомовыми водорослями [19, 20].

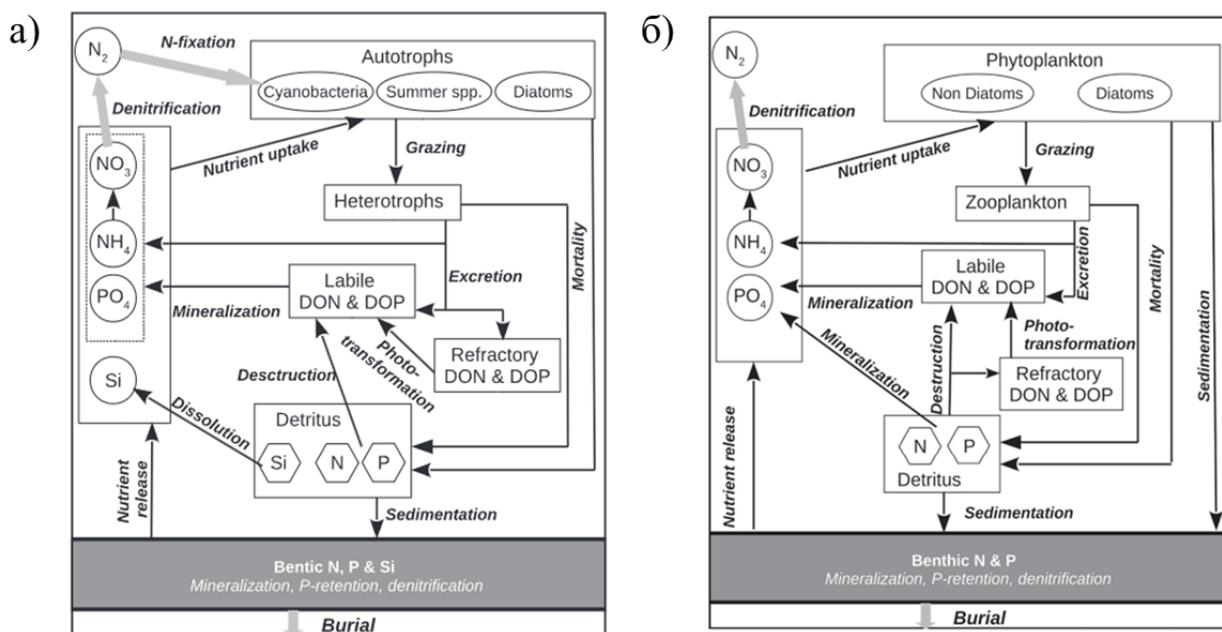


Рисунок 1.4 — Представление переменных и потоков питательных веществ в модели SPBEM-2: а) для Балтийского моря; б) для Онежского озера [2, 18]

Биогеохимический модуль описывает взаимодействие круговоротов азота и фосфора в воде и донных отложениях озера. Переменные состояния в пелагической подсистеме включают биомассы зоопланктона, двух функциональных групп фитопланктона (диатомовые и недиатомовые), концентрации детритного азота и фосфора, растворенные органические соединения азота и фосфора (лабильные и стойкие), а также растворенные неорганические соединения азота (аммоний и окисленный азот — нитриты и нитраты) и минеральный фосфор (фосфаты). Важным индикатором процессов является растворенный кислород, который выступает «регистратором» баланса продукционно-деструкционных процессов [20].

Подсистема донных отложений описывает динамику бентических форм азота и фосфора. Биогеохимические взаимодействия между этими переменными включают первичную продукцию фитопланктона, потребление растворенных минеральных соединений, выедание фитопланктона зоопланктоном, отмирание биомассы с последующим образованием детрита, регенерацию минеральных соединений через экскрецию и минерализацию, а также процессы денитрификации в воде и донных отложениях.

Гидродинамический модуль модели основан на MITgcm (Massachusetts Institute of Technology general circulation model), адаптированной для крупных стратифицированных водоемов, таких как озера Мичиган и Супериор [22, 23]. Для Онежского озера модель сконфигурирована с учетом батиметрии и включает схему турбулентного закрытия ТКЕ (пакет GGL90) для параметризации вертикального перемешивания. Коэффициенты горизонтальной турбулентной диффузии установлены постоянными, что оправдано относительно стабильными субарктическими условиями региона. Для учета ледового покрова в зимний период интегрирован пакет SeaIce, что позволяет адекватно воспроизводить гидрофизические процессы и решать уравнения адвекции-диффузии примесей — основу для биогеохимического моделирования экосистемы Онежского озера [2].

2 Модификация математической модели SPBEM-2 для Онежского озера с учетом двух групп диатомовых водорослей

2.1 Структуризация массовых видов диатомовых водорослей Онежского озера

Диатомовые водоросли (*Bacillariophyta*) — это одноклеточные, одиночные или колониальные эукариотические организмы, которые имеют микроскопические размеры. Они широко распространены в различных экосистемах, включая морские и пресноводные водоемы, а также наземные и воздушные среды. Диатомеи играют ключевую роль в пищевых цепях и участвуют в глобальных циклах углерода, кислорода и кремния [24].

Эти организмы являются отличными индикаторами состояния окружающей среды, что позволяет использовать их для оценки качества воды в пресноводных экосистемах. Диатомовые водоросли могут существовать как одиночно, так и образовывать разнообразные колонии, которые могут принимать различные формы: нити, ленты, цепочки, звездочки, кустики и бесформенные пленки [24, 25] (рисунок 2.1).

Диатомовые водоросли играют ключевую роль в биогеохимических циклах Онежского озера, составляя значительную часть фитопланктона и определяя продуктивность и качество воды в течение всего вегетационного периода. Они обеспечивают основу пищевых цепей и участвуют в процессах поглощения и переработки биогенных элементов, влияя на общее состояние экосистемы.

Структуризация диатомовых водорослей важна для более детализированного описания экосистемных процессов Онежского озера, так как разные размеры организмов влияют на их биологическую активность, скорость роста, чувствительность к экологическим факторам, а также

отличаются различными гидродинамическими свойствами, например, скоростью оседания.

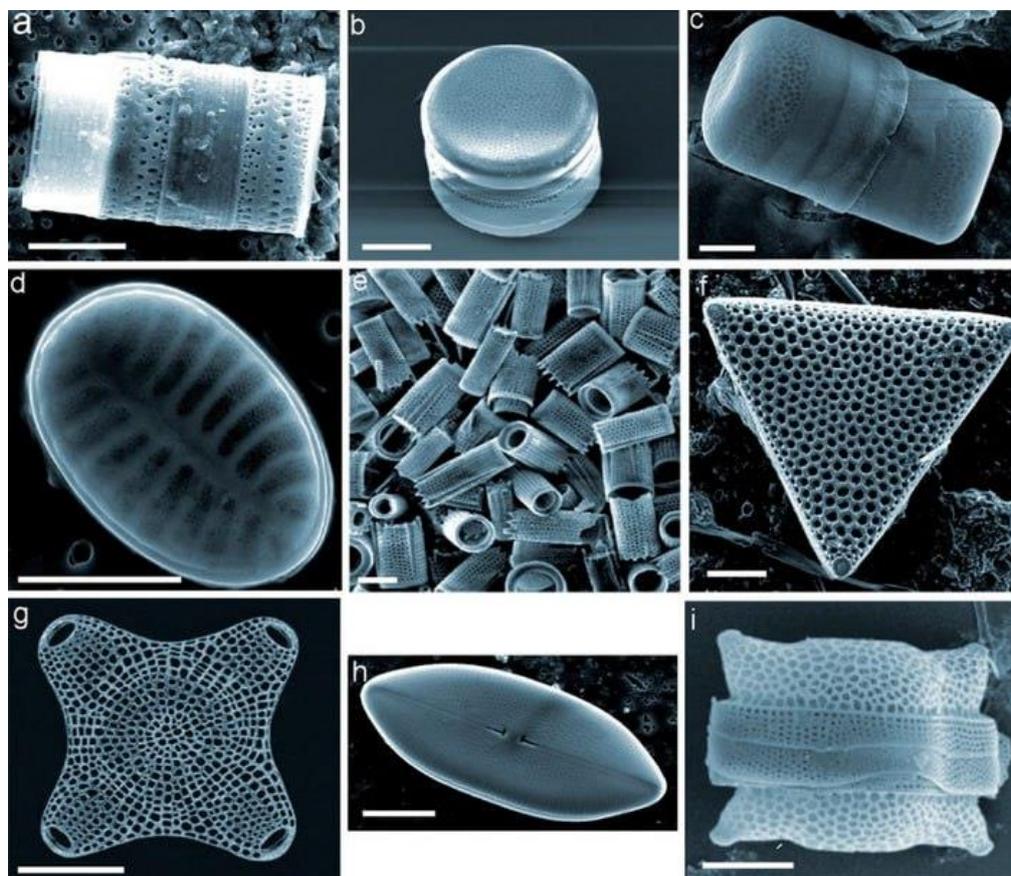


Рисунок 2.1 — Разнообразие структур и панцирей диатомей [26]

В рамках данной работы был проведен анализ массовых видов диатомовых водорослей, обитающих в Онежском озере. Для каждого вида был вычислен средний объем с использованием приближенных моделей: для вытянутой формы водоросли объем рассчитывался как объем цилиндра с двумя основаниями (створками) и заданной высотой, а для круглой формы применялась модель шара с учетом диаметра створки (рисунок 2.2).

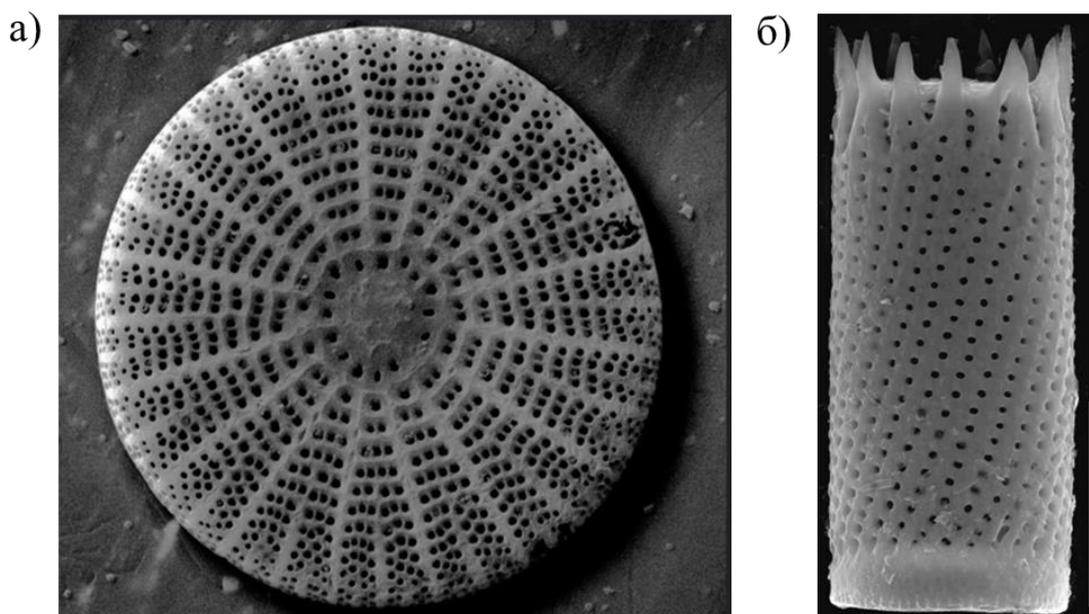


Рисунок 2.2 — Пример учета форм при расчете объема: а) *Lindavia radiosa* объем рассчитывался по модели шара; б) *Aulacoseira subarctica* объем рассчитывался как объем цилиндра [27]

Также была рассчитана средняя скорость оседания по закону Стокса (1):

$$V = \frac{d^2(\Delta\rho)g}{18\eta}, \quad (1)$$

где

V — скорость осаждения (м/с),

d — диаметр частицы (м),

$\Delta\rho$ — разница плотности между частицей и жидкостью (кг/м³),

g — ускорение свободного падения,

η — динамическая вязкость жидкости (Па·с).

По расчетам была выполнена группировка водорослей на основе их средних объемов. Водоросли с объемом менее 1000 мкм³ были отнесены к группе "малые" (small), в то время как водоросли с объемом более 1000 мкм³ были классифицированы как "большие" (big). Результаты представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Структуризация диатомовых водорослей
Онежского озера

Вид	Размер, мкм	Усредненный диаметр, мкм	Форма створок и симметрия	Средний объем, мкм ³	Средняя скорость осаднения, м/сут	
<i>Asterionella formosa</i> <i>Hassall</i>	длина: 45–68 ширина: 1,1–4,5	2.8	Форма створок: Длинные палочковидные клетки, могут образовывать звездчатые колонии. Симметрия: Радиальная	349.10	0.04	S m a l l
<i>Aulacoseira subarctica</i>	диаметр створок: 3–14 ширина 2,5–14	8.4	Форма створок: Цилиндрическая с характерными поперечными бороздками. Симметрия: Пеннатная .	441.87	0.33	
<i>P. Schumannii</i>	диаметр створок: 6–12,9	9.5	Форма створок: Овальная. Симметрия: Пеннатная	448.90	0.42	
<i>Diatoma tenuis</i> Ag.	длина: 20–85 ширина: 2,9–4,9	3.9	Форма створок: Линейно-вытянутая. Симметрия: Пеннатная (двусторонняя симметрия).	633.13	0.07	
<i>F. crotonensis</i> Kitton	длина: 90–115 ширина в центре: 2,5–3,0	2.8	Форма створок: Линейно-вытянутая. Симметрия: Пеннатная (двусторонняя симметрия).	634.22	0.04	
<i>Aulacoseira ambigua</i> .	диаметр створок: 3–12 мкм ширина 5–15	7.5	Форма створок: Цилиндрическая с характерными поперечными бороздками. Симметрия: Пеннатная	785.40	0.26	
<i>Fragilaria capucina</i> <i>Desmazières</i>	длина: 10–100 ширина: — 2–6,5	4.3	Форма створок: Линейная, с характерной вытянутой формой. Симметрия: Пеннатная	798.71	0.09	
<i>Tabellaria fenestrata</i>	длина: 39,0–83,0 ширина: 2,1–6,9	4.5	Форма створок: Линейная с характерными поперечными бороздками. Симметрия: Пеннатная	970.16	0.1	
<i>Aulacoseira italica</i>	диаметр: 4–24 ширина: 9–20	14.5	Форма створок: Цилиндрическая с характерными поперечными бороздками. Симметрия: Пеннатная	1155.90	0.99	B i g
<i>T. flocculosa</i> (Roth.) <i>Kützing</i>	длина: 11,2–82,7 ширина: 3,2–8,8	6.0	Форма створок: Цилиндрическая или овальная. Симметрия: Радиальная симметрия.	1328.89	0.17	
<i>Aulacoseira islandica</i> (O. Müller) Simonsen	длина: 5–20 ширина: 8,9–18,3	13.6	Форма створок: Цилиндрическая с характерными поперечными бороздками. Симметрия: Пеннатная	1815.84	0.87	
<i>Lindavia radiosa</i>	диаметр створок: 10,9- 23,8	17.4	Форма створок: Радиально-симметричная, концентрически волнистая. Симметрия: Радиальная	2758.30	1.42	
<i>Stephanodiscus neoastraea</i>	диаметр створок: 10–30	20.0	Форма створок: Центрическая с характерными поровыми структурами. Симметрия: Радиальная	4188.80	1.88	

При сортировке планктона по объёму было выявлено несоответствие в порядке значений диаметра и скорости оседания. Это связано с тем, что скорость оседания, рассчитанная по закону Стокса, зависит только от диаметра, тогда как объём цилиндра определяется как диаметром, так и высотой клетки. В результате организмы с меньшим объёмом, но большим диаметром могут оседать быстрее, чем более объёмные, но узкие особи.

В будущем планируется доработка классификации, так как она может быть перспективной для более точного анализа распределения планктона и его роли в экосистеме. Особое внимание будет уделено учёту скорости оседания как ключевого параметра, влияющего на биогеохимические процессы. Крупные особи планктона, как правило, оседают быстрее и, соответственно, быстрее подвергаются минерализации, что усиливает вертикальный поток органического вещества и биогенных элементов.

Стоит отметить, что полученные оценки геометрических и динамических характеристик являются приближенными и предназначены для общего представления. Для задач, требующих более высокой точности, необходимо учитывать сложность форм диатомовых водорослей, а также тот факт, что многие виды образуют колонии, что существенно влияет на скорость оседания. В данной работе такие факторы для наглядности не учитывались, что следует принимать во внимание при интерпретации результатов.

Из анализа структуры биомассы фитопланктона Онежского озера видно, что в весенней и осенней периоды доминирующими видами являются крупноклеточные водоросли рода *Aulacoseira*, в то время как в летний период наряду с недиотомовыми, преобладают более мелкие диатомовые водоросли видов *Tabellaria fenestrata*, *Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis*. Представленные выше оценки скоростей гравитационного оседания для различных видов диатомовых водорослей показывают, что выделение в модели двух самостоятельных групп диатомовых водорослей «small» и «big» представляется обоснованным и может позволить улучшить качество воспроизведения продукционных процессов в Онежском озере.

2.2. Постановка задачи

Исходя из анализа структуры диатомовых водорослей Онежского озера, было установлено, что данная группа характеризуется высоким видовым разнообразием и выраженной сезонной динамикой. Для более полного и корректного отражения вклада различных таксонов в биогеохимические процессы озерной экосистемы, а также для повышения точности моделирования круговорота веществ, в модели SPBEM-2 функциональная группа «диатомовые водоросли» была дифференцирована на две подгруппы: летние виды (small) и весенние виды (big) (рисунок 2.3). Такой подход позволяет более полно учитывать особенности сезонного развития диатомовых водорослей и их роль в формировании первичной продукции и трансформации биогенных элементов в Онежском озере.

Для воспроизведения динамики весеннего и летнего диатомового фитопланктона использовались параметризации описанные в работе [2]. Все параметры и коэффициенты для введенного летнего диатомового планктона, задавались аналогично весеннему, за исключением скорости гравитационного оседания. Скорость гравитационного оседания для летнего диатомового фитопланктона задавалась в 2 раза меньше по сравнению с весенним.

Состав основных переменных и биогеохимических потоков модели, дополненный новой группой диатомовых водорослей (A1), представлен в таблице 2.2.

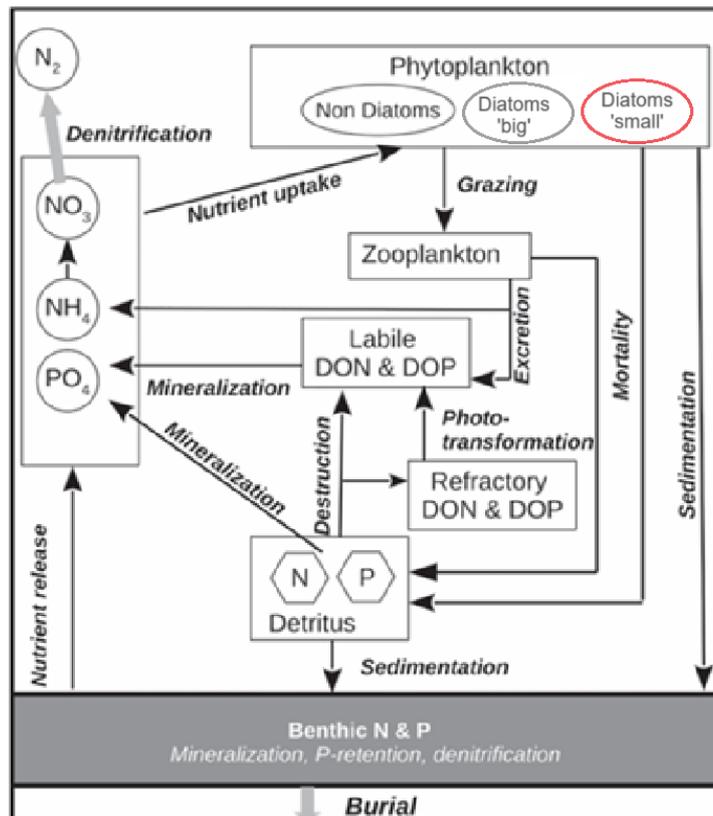


Рисунок 2.3 — Представление переменных и потоков питательных веществ в модели SPBEM-2, адаптированной для Онежского озера с учетом двух видов диатомовых водорослей

Общий вид уравнения адвекции-диффузии неконсервативной примеси для любой биогеохимической переменной C (концентрация вещества или биомасса) в трехмерной постановке имеет вид уравнения (2):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}C) = \nabla \cdot (K\nabla C) + \Phi_C, \quad (2)$$

где:

\vec{v} — вектор скорости течения (адвективный перенос);

K — коэффициент турбулентной диффузии;

Φ — функция неконсервативности, описывающая источники/стоки вещества.

Таблица 2.2 Основные переменные и потоков модели

Обозначение	Описание	Единицы измерения
A ₁	Летние диатомовые автотрофы	мг N/м ³
A ₂	Весенние диатомовые	мг N/м ³
A ₃	Недиатомовые	мг N/м ³
ZH	Гетеротрофы (зоопланктон)	мг N/м ³
DP	Взвешенный органический фосфор	мг P/м ³
NP	Фосфат (PO ₄ ³⁻)	мг P/м ³
LDOP	Лабильный растворённый органический фосфор	мг P/м ³
RDOP	Стойкий растворённый органический фосфор	мг P/м ³
O ₂	Растворённый кислород	г O ₂ /м ³
BP	Донный (бентосный) фосфор	мг P/м ²
PP _i	Чистая первичная продукция (рост) i-й группы автотрофов	мг N/м ² /сут
M _i	Смертность i-й группы автотрофов	мг N/м ² /сут
G _i	Поедание i-й группы автотрофов зоопланктоном	мг N/м ² /сут
S _i	Оседание автотрофов i-й группы	мг N/м ² /сут
EP	Экскреция фосфата гетеротрофами	мг P/м ² /сут
MZ	Смертность гетеротрофов	мг N/м ² /сут
MH	Смертность гетеротрофов (в детрит)	мг N/м ² /сут
UP	Неусвоенная пища (фосфор)	мг P/м ² /сут
WDP	Разрушение детрита (фосфор)	мг P/м ² /сут
GP	Поедание детрита (фосфор)	мг P/м ² /сут
SP	Оседание детрита (фосфор)	мг P/м ² /сут
WDLP	Минерализация лабильного DOP	мг P/м ² /сут
VP	Поглощение фосфата автотрофами	мг P/м ² /сут
WDRP	Фототрансформация рефрактерного DOP в лабильный	мг P/м ² /сут
EDOM	Доля экскреции, идущая в органическую форму	—
FDET	Доля разрушения детрита, переходящая в DOP	—
λZH	Стехиометрический коэффициент N:P для гетеротрофов	—
λAN	Стехиометрический коэффициент N:P для автотрофов	—
α _n	Стехиометрический коэффициент N:P для донных процессов	—

Рассмотрим более подробно правые части основных функций консервативности в системе уравнений адвекции-диффузии для Онежского озера, включая уравнение для летних (small) диатомей (3)-(12):

$$\Phi_{A1} = PP_1 - M_1 - G_1 - S_1 \quad (3)$$

$$\Phi_{A2} = PP_2 - M_2 - G_2 - S_2 \quad (4)$$

$$\Phi_{A3} = PP_3 - M_3 - G_3 - S_3 \quad (5)$$

$$\Phi_{ZH} = KN - EN - M_Z \quad (6)$$

$$\Phi_{DP} = \frac{M_H}{\lambda_{ZH}} + U_P + \frac{M_1}{\lambda_{AN}} + \frac{M_2}{\lambda_{AN}} + \frac{M_3}{\lambda_{AN}} - W_{DP} - G_P - S_P \quad (7)$$

$$\Phi_{NP} = (1 - EDOM) \cdot E_P + W_{DLP} + (1 - F_{DET}) \cdot W_{DP} - V_P \quad (8)$$

$$\Phi_{LDOP} = EDOM \cdot E_P - W_{DLP} + W_{DRP} + F_{DET} \cdot W_{DP} \quad (9)$$

$$\Phi_{RDOP} = -W_{DRP} \quad (10)$$

$$\Phi_{O2} = \beta_{PE}(PP_1 + PP_2 + PP_3) + \beta_{WR}WR - \beta_{WR}W_{DN} - [\beta_{PE}EN + \beta_{WD}W_{DN} + \beta_{WO}WO + \beta_{WD}W_{DLN}] \cdot \left[1.5 + 0.5 \cdot \tanh\left(\beta_{BOC} - \frac{O_2}{\beta_{SBOC}}\right)\right] \quad (11)$$

$$\frac{dBP}{dt} = \frac{S_1}{a_n} + \frac{S_2}{a_n} + \frac{S_3}{a_n} + S_P + X_P - WPB - BBP \quad (12)$$

В данной постановке модели для Онежского озера, где цикл кремния исключен из-за его избыточной концентрации, а также исключена азотфиксация из-за фосфорного лимитирования, что привело к

удалению diaзотрофных цианобактерий., система уравнений описывает круговорот фосфора и кислорода, а также динамику автотрофов и гетеротрофов (таблица 2.2). Уравнения (3)–(5) отражают изменения биомассы трех групп автотрофов (летних диатомовых, весенних диатомовых и недиаatomовых водорослей соответственно) под действием процессов первичной продукции (роста), смертности, выедания зоопланктоном и оседания клеток на дно. Уравнение (6) описывает динамику гетеротрофов (зоопланктона) с учетом потребления пищи, экскреции и смертности.

Уравнение (7) характеризует формирование и разрушение органического детрита фосфора: его образование связано со смертностью организмов и неусвоенной пищей, а уменьшение происходит за счет минерализации, выедания и оседания на дно. Уравнение (8) отражает баланс минерального фосфора (PO_4^{3-}) в воде, учитывая поступление из экскреции, минерализации органики и разрушения детрита, а также потребление автотрофами.

Уравнение (9) описывает динамику лабильного растворенного органического фосфора (LDOP), который образуется в результате экскреции, фототрансформации и разрушения детрита, а расходуется за счет минерализации. Уравнение (10) характеризует динамику рефрактерного растворенного органического фосфора (RDOP), уменьшающегося только за счет фототрансформации в лабильную форму.

Уравнение (11) задает баланс растворенного кислорода, учитывая процессы фотосинтеза (выделение кислорода автотрофами), дыхания и минерализации органических веществ. При исключении всех потоков, связанных с азотом, в этом уравнении остаются только процессы, связанные с фосфором и органическим веществом.

Уравнение (12) описывает динамику донного (бентосного) фосфора, учитывая поступление за счет оседания органики, а также уменьшение в результате возврата фосфора в воду и захоронения в донных отложениях.

2.3 Краевые условия модели

В модели SPBEM2 для трехмерной ретроспективной оценки биогеохимической динамики азота и фосфора в экосистеме Онежского озера краевые условия задаются с учетом комплексного влияния атмосферных параметров, поступления биогенных веществ из различных источников и антропогенных нагрузок. Годовой вклад питательных веществ, поступающих из атмосферы, оценивается в 65–80 тонн общего фосфора и около 2260 тонн общего азота, что подчеркивает значимость атмосферного пути поступления биогенов в экосистему озера. Основные антропогенные источники загрязнения — промышленные районы Петрозаводска, Кондопоги и Медвежьегорска, с годовым поступлением 170–250 тонн общего фосфора и около 2650 тонн общего азота. Кроме того, с середины 2000-х годов коммерческое рыбоводство добавляет дополнительно около 40 тонн общего фосфора и 228 тонн общего азота ежегодно [28].

В работе [2] (Исаев А.В., Савчук О.П., Филатов Н.Н.) для задания атмосферного форсинга и учета внешних нагрузок биогенными веществами применялись следующие подходы:

- для описания атмосферного воздействия в расчетах использовались поля повторного анализа ERA-Interim, включающие давление, компоненты скорости ветра, температуру воздуха, влажность, коротковолновую и длинноволновую входящую радиацию, а также осадки.

- внешние нагрузки биогенных веществ — общего фосфора (ОФ) и общего азота (ОА) — задавались на основе реконструкции по стоку рек и концентрации азота и фосфора в них.

Реконструкция межгодовой изменчивости поступления биогенов из внешних источников — рек, сточных вод и атмосферы — выполнена на основе опубликованных оценок (рисунок 2.4). Основные доли биогенных веществ поступают с речным стоком (66 % ОФ и 67 % ОА), сточными водами (23 % ОФ и 5 % ОА) и атмосферными осадками (11 % ОФ и 28 % ОА). Биодоступность

растворенного органического азота и фосфора принята равной 30 % и 90 % соответственно [29].

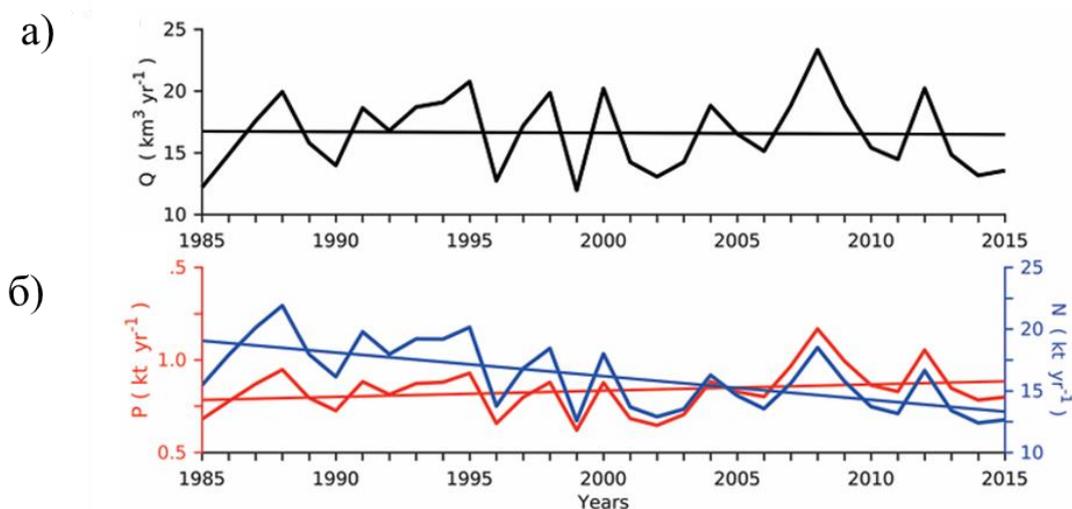


Рисунок 2.4 — Расчетный годовой речной сток (а) и полные внешние поступления общего азота и фосфора (б) [2]

В работе [2] выполнена оценка динамики межгодовой и сезонной изменчивости экосистемы Онежского озера за период с 1985 по 2015 гг.

Настоящее исследование направлено на изучение влияния воспроизведения первичной продукции фитопланктона при учете 2-х видов диатомовых водорослей по сравнению с исследованиями, выполненными в работе [2]. С этой целью было выполнено два численных эксперимента при одинаковых внешних условиях. В первом эксперименте модель соответствовала конфигурации, изложенной в работе [2]. Второй, с модифицированной конфигурацией, учитывающей 2 вида диатомовых водорослей. В обоих экспериментах расчет выполнялся до получения квазиустановившегося решения при повторяющихся внешних воздействиях, учитывающих сезонный ход. Для задания условий на границе с атмосферой был выбран год, максимально приближенный к средним метеорологическим характеристикам за период 2006–2020 гг. (подробнее см. п. 3.1). Поступления

биогеохимических процессов Онежского озера задавались как средние за период с 2006 по 2020 годы.

2.4 Численная реализация модели

Модель гидрофизических и биогеохимических процессов Онежского озера реализована на сферической сетке с горизонтальным шагом 1,079' по широте и 2,331' по долготе, что соответствует пространственному разрешению 2×2 км (рис. 2.5а). Вертикальная координата задана в z-системе с равномерным шагом 2 м от поверхности до дна. Временная дискретизация модели составляет 400 секунд. Такой подход обеспечивает возможность детализации оценок для ключевых лимнических районов озера (рис. 2.5б), включая открытые акватории и наиболее значимые заливы, и позволяет адекватно воспроизводить гидродинамические и биогеохимические процессы в масштабах всего водоема.

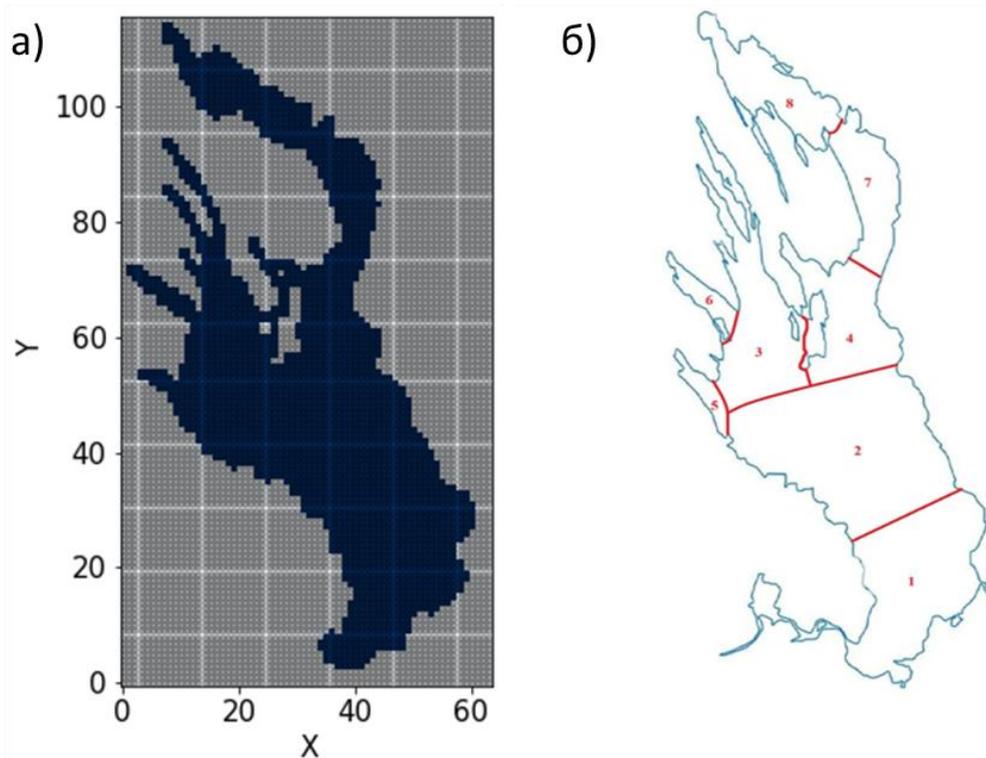


Рисунок 2.5 — Онежское озеро: расчетная область с узлами сетки (а), лимнические районы озера (б): 1 – Южное Онего; 2 – Центральное Онего; 3 – Большое Онего; 4 – Малое Онего; 5 – Петрозаводская губа; 6 – Кондопожская губа; 7 – Заонежский залив; 8 – Повенецкий залив.

Для реализации данного подхода был разработан специализированный модуль осреднения в программном пакете Python (см. Приложение А).

Осреднение производилось по формуле (13):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i v_i}{\sum_{i=1}^n v_i}, \quad (13)$$

где C – средняя концентрация в ячейке, C_i – концентрация в i -ой точке, V_i – объем ячейки.

В качестве параметров модели для вычисления объемов использовались толщина ячеек drF (для верхнего слоя с учетом изменения уровня воды $drF = \Delta z + \xi$) в метрах и площадь ячеек rA , выраженная в квадратных метрах. Такой подход обеспечивает корректное учет пространственного распределения концентраций с весом, пропорциональным объему каждого элемента, что повышает точность оценки средних значений в верхнем слое водной толщи.

Результаты моделирования анализировались для верхнего слоя как всего озера, так и отдельных его районов (рисунок 2.5б).

3 Результаты моделирования биогеохимических циклов Онежского озера с учетом трех видов фитопланктона

3.1 Метеорологические условия выполнения численных экспериментов

Для определения условий на границе раздела атмосфера-озеро был произведен выбор года, наиболее близкого по значениям метеорологических параметров к средним значениям за период с 2006 по 2020 год. В качестве исходных данных были использованы срочные данные метеорологических параметров, полученные с сайта rp5 [<https://rp5.ru>], включающие температуру воздуха, давление, скорость и направление ветра, для метеостанций Вытегра, Пудож, Медвежьегорск, Кондопога и Петрозаводск за период с 2006 по 2020 годы. Схема расположения станций представлена на рисунке 3.1

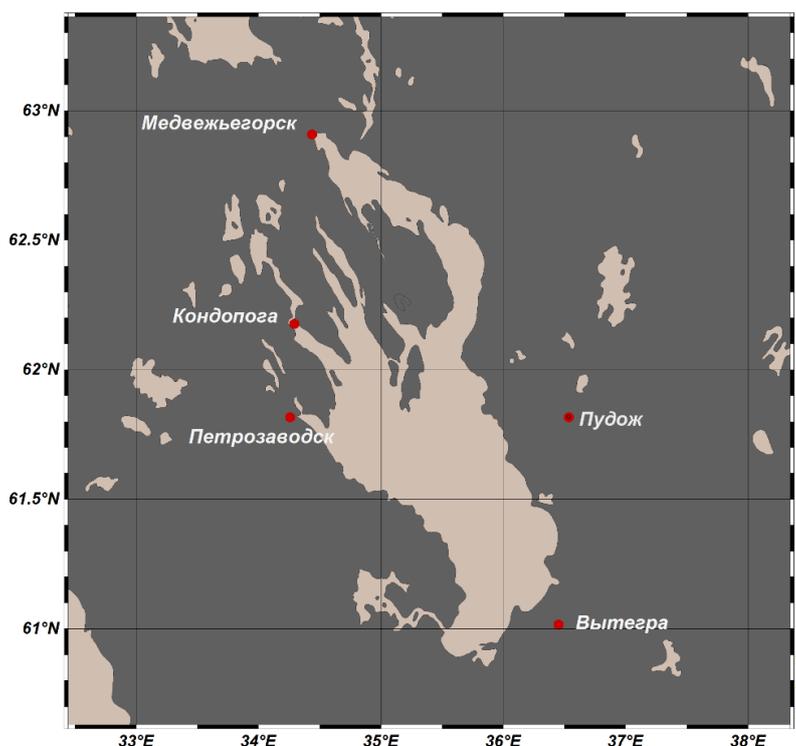


Рис. 3.1 Карта-схема расположения метеостанций в районе Онежского озера

Выбор указанных метеостанций обусловлен их географическим положением, позволяющим наиболее полно охарактеризовать метеорологические условия Онежского озера.

В ходе анализа были рассчитаны среднемесячные значения всех метеопараметров, а также выполнено усреднение данных между станциями. Полученные ряды содержали по 180 среднемесячных значений.

Далее был проведен корреляционный анализ для оценки степени соответствия исследуемых метеорологических условий конкретного года усредненным значениям по всем метеопараметрам за весь период. Результаты представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Значения коэффициентов корреляции между рядами метеопараметров за исследуемые годы и средними значениями этих характеристик за период 2006-2020 гг.

Год	Температура воздуха (Т)	Атмосферное давление (P _о)	Скорость ветра (F _f)	Направление ветра (D _D)
2006	0.96	0.23	0.41	-0.26
2007	0.94	0.12	0.66	0.22
2008	0.99	0.26	0.62	0.54
2009	0.98	0.03	0.28	-0.35
2010	0.98	0.17	0.55	0.36
2011	0.97	0.51	0.79	0.92
2012	0.98	0.08	0.68	0.63
2013	0.96	0.38	0.82	0.86
2014	0.97	0.36	0.65	0.61
2015	0.98	0.12	0.76	0.13
2016	0.95	0.38	0.27	0.17
2017	0.97	0.72	0.89	-0.12
2018	0.98	0.36	0.39	0.63
2019	0.98	0.30	0.61	0.24
2020	0.97	-0.34	0.47	-0.15

После изучения результатов корреляционного анализа 2011 год был определен как наиболее близкий по своим параметрам к усредненным значениям за рассматриваемый временной промежуток. Также стоит отметить, что метеопараметры за 2017 год также демонстрируют высокую корреляцию с усредненным годом, однако за исключением направления ветра. В этом случае наблюдается обратная зависимость указанного параметра, которая говорит о том, что в 2017 году направление ветра имело тенденцию к отклонению от среднегодовалого.

Выделенные ранее года имеют высокие значения коэффициентов корреляции между собой для рядов температуры воздуха и скорости ветра. Также наблюдается менее выраженная корреляция между ходом давления. Отрицательный коэффициент корреляции рядов направления ветра указывает, что в 2011 году и 2017 году незначительно преобладали ветра противоположных направлений (таблица 3.2).

Таблица 3.2 — Значения коэффициентов корреляции между рядами метеопараметров за 2011 год и 2017 год

Метеопараметр	Температура воздуха (T)	Атмосферное давление (Po)	Скорость ветра (Ff)	Направление ветра (DD)
Коэффициент корреляции	0.97	0.30	0.85	-0.10

Для более полного анализа направления ветра для 2011 года и для 2017 года была рассчитана повторяемость направлений скорости ветра (рисунок 3.2), а также повторяемость скоростей ветра для этих годов (рисунок 3.3).

Анализ ветрового режима над Онежским озером в 2011 и 2017 годах выявил как общие закономерности, так и значимые межгодовые различия, обусловленные особенностями циркуляции атмосферы и локальными факторами. Общим для обоих периодов является преобладание ветров южного

и юго-восточного направлений, что свидетельствует об устойчивости процессов атмосферной циркуляции в регионе. Сезонные изменения также демонстрируют сходные черты: увеличение повторяемости ветров северных румбов в зимний период и южных – в летний. Штиль и безветрие наиболее часто регистрируются в зимние месяцы, особенно в январе, что можно связать с ослаблением градиента давления и преобладанием антициклональных условий.

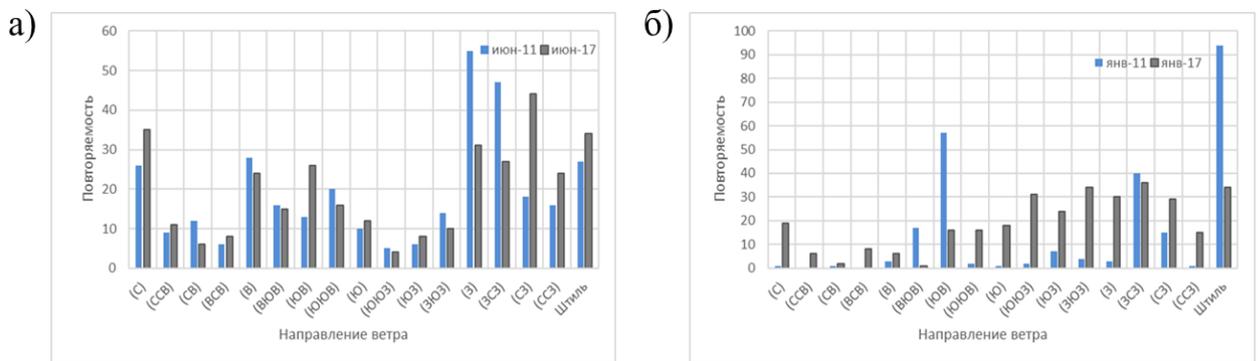


Рисунок 3.2 — Среднемесячная повторяемость направлений ветра: а) для июня 2011 г. и 2017 г. ; б) для января 2011г. и 2017 г.

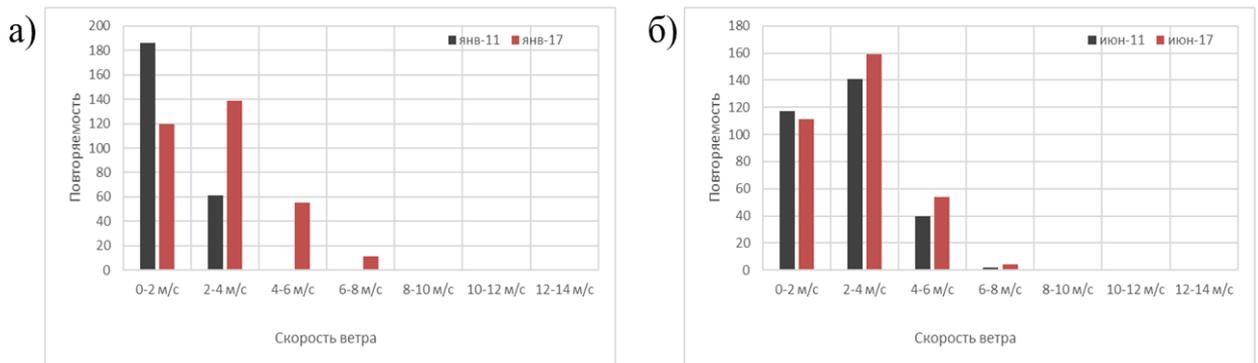


Рисунок 3.3 — Среднемесячная повторяемость скорости ветра: а) для июня 2011 г. и 2017 г. ; б) для января 2011 г. и 2017 г.

Вместе с тем, анализ выявил существенные межгодовые различия. В январе 2011 года отмечалась аномально высокая повторяемость штилей, указывающая на доминирование антициклональной циркуляции. В марте того же года преобладали ветры юго-западного направления, а в ноябре – северо-западного. В 2017 году, напротив, наблюдалось более равномерное распределение ветров по направлениям в течение года. В июле этого года зафиксирован пик повторяемости северных ветров, а в августе – штилей. В зимние месяцы 2017 года преобладали ветры южного и юго-восточного направлений.

В целом, ветровой режим над Онежским озером характеризуется как устойчивыми элементами, связанными с общей циркуляцией атмосферы, так и значительной межгодовой изменчивостью, обусловленной влиянием локальных факторов. Большая изменчивость повторяемости ветров различных направлений в 2011 году по сравнению с 2017 годом может указывать на более неустойчивый характер атмосферных процессов в 2011 году, что отображает рисунок 3.2.

В дополнении к анализу направления ветра, для 2011 и для 2017 годов был проведен анализ повторяемости скоростей ветра. Результаты расчетов для января и июня представлены на рисунке 3.3

В 2011 и 2017 годах преобладают низкие скорости ветра (0-4 м/с). Высокие скорости (8 м/с и выше) редки. Сезонность проявляется увеличением случаев в диапазонах 2-6 м/с летом. В 2017 году чаще встречались скорости 2- 6 м/с, особенно во второй половине года, и реже - скорости 0-2 м/с, чем в 2011 году. Также в 2017 году отмечен рост числа случаев в диапазоне 4-6 м/с в октябре-декабре. В 2017 один раз зафиксирован ветер 12-14 м/с. В целом, в 2017 году скорости ветра были выше, чем в 2011 году.

В итоге, на основании проведенного анализа, для задания начальных условий был выбран 2011 год как наиболее близкий к усредненным метеорологическим характеристикам исследуемого периода.

3.2 Сезонная изменчивость компонентов биогеохимического цикла Онежского озера

На основе двух блоков данных, в первом из которых в диатомовых водорослях не учитывалась функциональная группа «small» (A1), с использованием модели SPBEM-2, адаптированной для экосистемы Онежского озера, были построены графики сезонной динамики концентраций неорганического фосфора, лабильного растворенного фосфора (LDOP, мгP/м³), стойкого растворенного фосфора, фосфора в детрите, а также биомассы продукции различных групп фитопланктона: летних диатомовых водорослей (A1), весенних диатомовых (A2) и недиатомовых (A3). Кроме того, был проанализирован сезонный ход температуры поверхности воды за выбранный ранее 2011 год. Для верификации, модельные расчеты динамики биомассы фитопланктона сравнивались с натурными данными о динамике первичной продукции, представленными на рисунке 3.4 [30] и рисунке 3.5 [31].

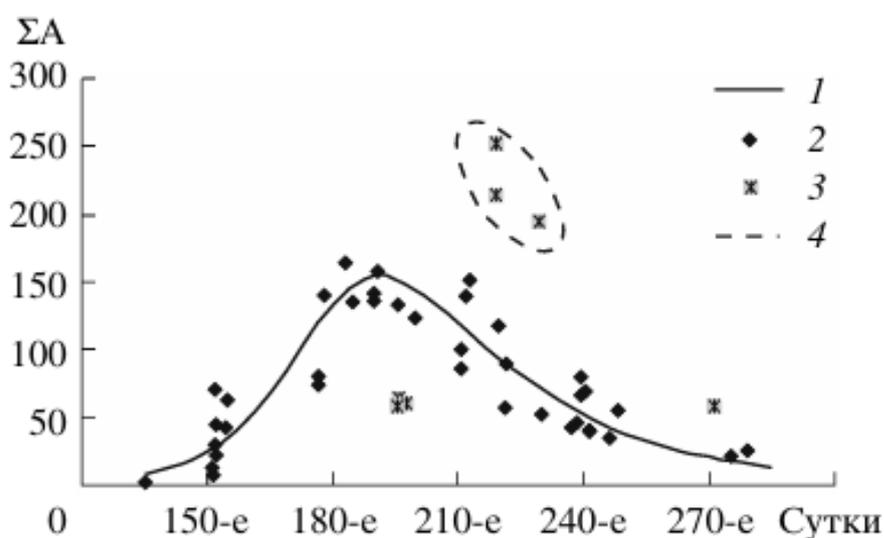


Рисунок 3.4 — Суточная первичная продукция в мг углерода:

1 - кривая аппроксимации, 2 - натурные данные, 3 - выскакивающие точки, 4 - точки, отклоняющиеся вследствие антропогенного воздействия. [28].

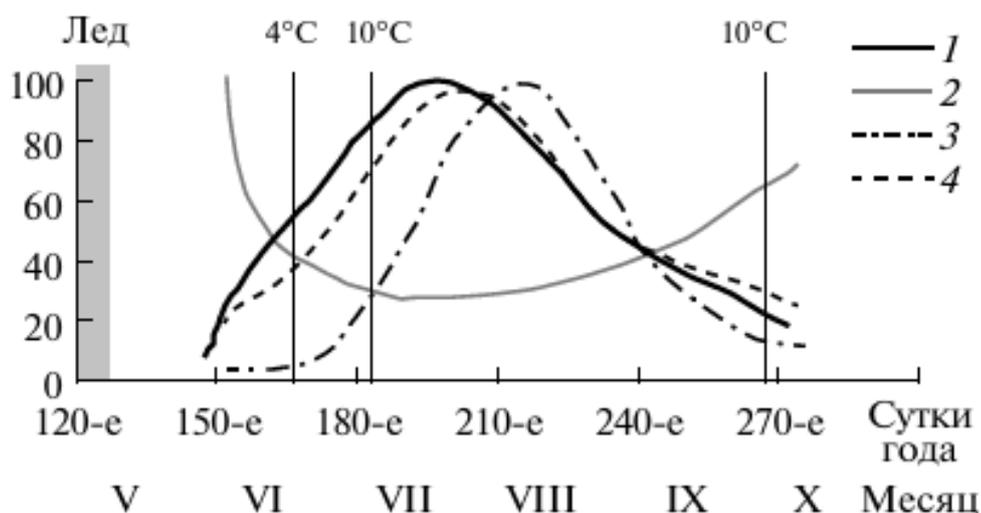


Рисунок 3.5 — Среднемноголетняя траектория сезонной динамики первично-продукционного (PP) процесса и внутренних факторов среды. 1 - PP, 2 - биомасса диатомовых водорослей, 3 - биомасса "недиатомового" фитопланктона, 4 - хлорофилл, *a* [29]

Результаты моделирования биогеохимических циклов для Онежского озера с одной и двумя группами диатомовых водорослей представлены на рисунках 3.6 и 3.7. Осредненные значения относятся к верхнему 2-метровому слою.

Температурный режим поверхности Онежского озера в 2011 году, представленный на графике (рисунок 3.6 г), соответствует средним метеорологическим характеристикам за период 2006–2020 годов и отражает типичные сезонные колебания, характерные для умеренно-континентальных водоемов северо-западной части России.

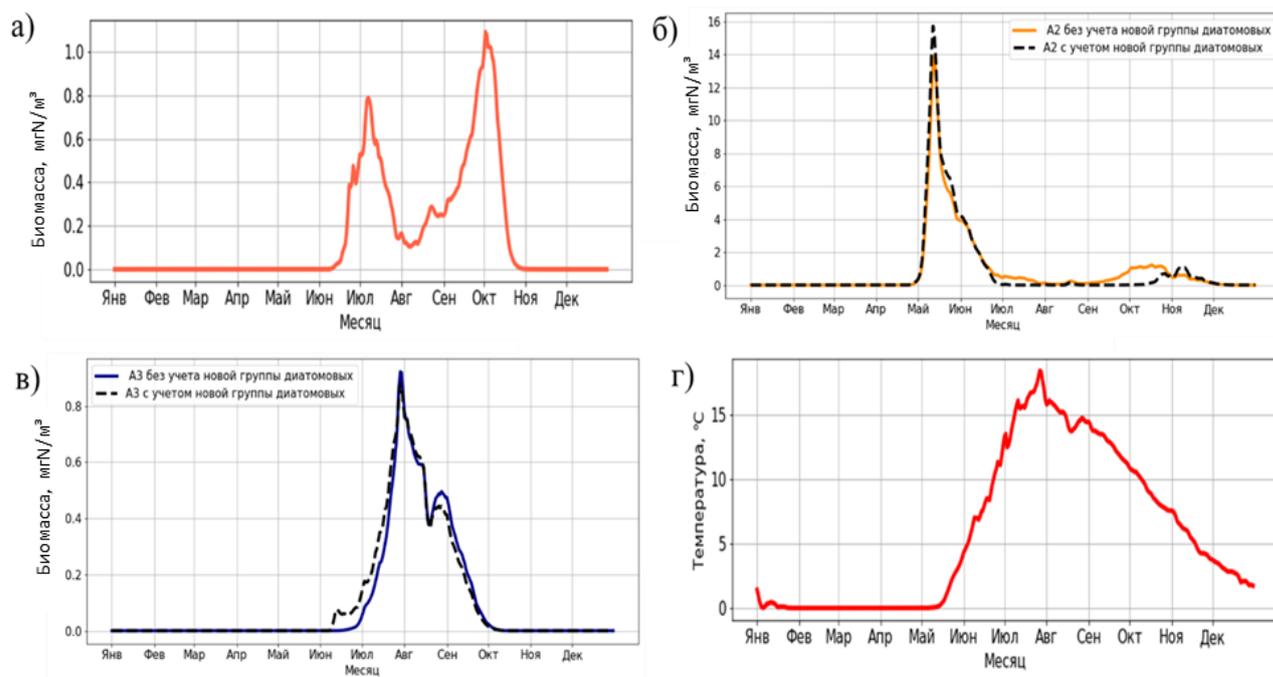


Рисунок 3.6 — Результаты моделирования сезонной изменчивости для всей акватории Онежского озера: а) биомассы летнего комплекса диатомовых водорослей; б) биомассы весеннего комплекса диатомовых водорослей; в) биомассы комплекса недиатомовых; г) температуры поверхностного слоя воды

В зимний период (январь–март) температура воды поддерживается на уровне, близком к 0 °С, что объясняется ледоставом и низкими температурами воздуха. С наступлением весны (апрель–май) наблюдается постепенное повышение температуры, связанное с увеличением солнечной радиации и прогревом во дной толщи.

В июне происходит интенсивный рост температуры поверхностного слоя, достигающий максимальных значений в июле — около 17 °С, что обусловлено максимальной солнечной инсоляцией. После пика в июле температура начинает снижаться: в августе и сентябре происходит охлаждение, вызванное уменьшением поступления солнечной энергии и увеличением теплоотдачи.

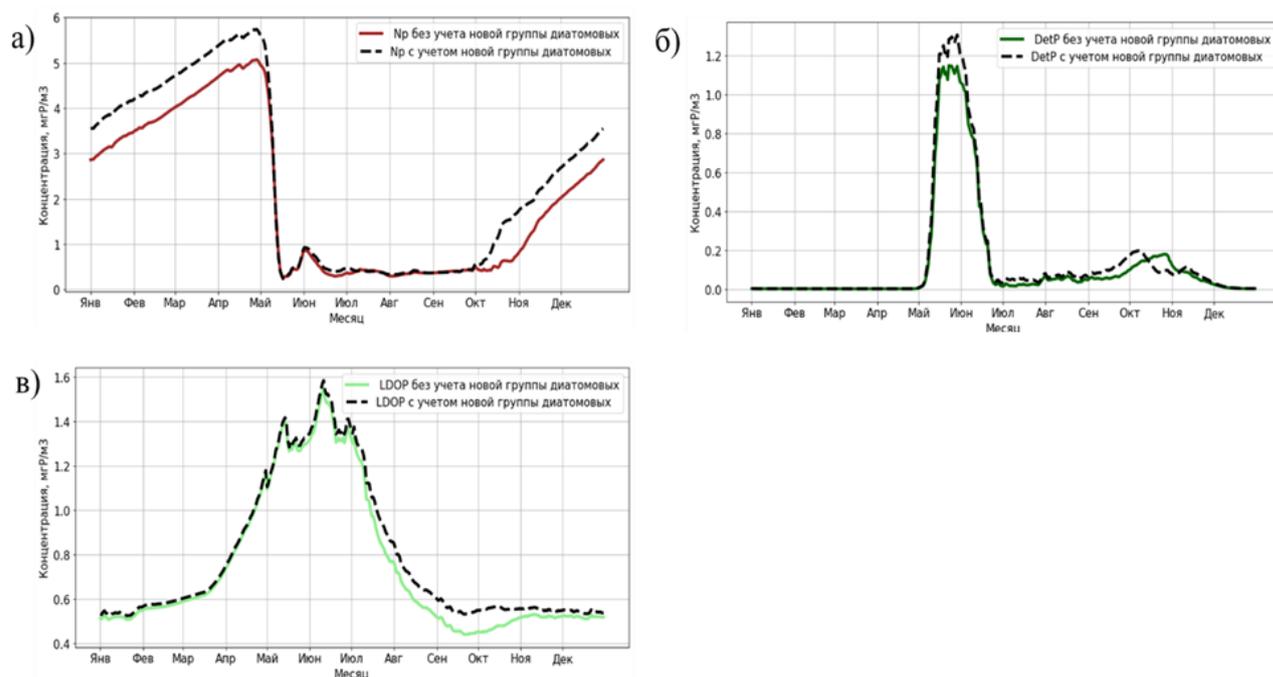


Рисунок 3.7 — Результаты моделирования сезонной изменчивости для всей акватории Онежского озера: а) концентрации фосфатов; б) концентрации фосфора в детрите; в) концентрации лабильного растворенного фосфора

В осенний период (октябрь–ноябрь) температура воды продолжает снижаться до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, а к декабрю устанавливается зимний температурный режим с температурой около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, температурный режим поверхности Онежского озера в 2011 году демонстрирует ярко выраженную сезонную изменчивость, обусловленную климатическими факторами региона, и соответствует средним значениям за два последних десятилетия.

Введение новой функциональной группы летних диатомовых водорослей в модель SPBEM-2 для Онежского озера позволило получить более детализированную картину сезонной динамики первичной продукции и трансформации соединений фосфора. Результаты моделирования для всей акватории демонстрируют характерный для олиготрофных водоемов сезонный цикл с единственным выраженным максимумом первичной продукции в июле.

Этот максимум полностью соответствует натурным наблюдениям Сярки и Текановой (2008) [30], которые отмечали среднемноголетний максимум интегральной первичной продукции в диапазоне 137–154 мг C/(м²·сут) во второй декаде июля, который обеспечивается недиатовым комплексом.

На графиках рисунка 3.6 видно, что введение группы А1 существенно изменило распределение биомассы диатомового комплекса. Если ранее весенние диатомеи (А2) доминировали в мае–июне с пиком около 16 мгN/м³, то летние диатомеи (А1) формируют два выраженных вторичных пика: в июле — примерно 0.6 мгN/м³ и в сентябре–октябре около 1.2 мгN/м³. Пики диатомовых комплексов асинхронны с максимумом недиатовых водорослей (А3), около 0.9 мгN/м³, который начинается во второй декаде июня, что также соответствует натурным наблюдениям. Данная динамика согласуется с выводами Текановой и Сярки (2015) [29], которые отмечали наличие двух сезонных пиков диатомей — весеннего и осеннего, а также асинхронность их развития относительно общего максимума первичной продукции, обусловленного развитием недиатового комплекса [31].

Модельные данные хорошо согласуются с фенологическими фазами первично-продукционного цикла. Ранневесенняя фаза приходится на начало мая, когда Онежское озеро очищается ото льда, что подтверждается среднемноголетними наблюдениями и связано с развитием холодолюбивого крупноклеточного диатомового комплекса, преимущественно представленного родом *Aulacoseira*. В этот период продукция теплолюбивых недиатовых водорослей минимальна. Поздневесенняя фаза отмечается на графиках модели в третьей декаде июня, при прогреве воды около 4 °С, и характеризуется снижением активности группы А2 и активным развитием группы А1. Также начинается развитие недиатового комплекса, что не было отражено в модели до введения весенней группы диатомей. Летняя фаза начинается при прогреве воды до 10 °С в первой декаде июля и характеризуется доминированием мелкоклеточных летних диатомей, которые к августу сменяются недиатовой группой. Осенний период, для которого

характерно усиление ветрового перемешивания, начинается со второй декады сентября, сопровождается регрессом недиатомового комплекса и повторным наращиванием биомассы холодолюбивых диатомовых водорослей [24].

В целом, модель SPBEM-2 с учетом введения новой функциональной группы хорошо воспроизводит сезонную изменчивость биомассы в Онежском озере, что подтверждается сопоставлением с натурными данными, отражающими среднемноголетнюю сезонную динамику первичной продукции.

Зафиксирована асинхронность максимумов продуктивности диатомового и недиатомового фитопланктонных комплексов, а также выявлена синхронизация циклов первичной продукции с температурными изменениями. Кроме того, отмечены два пика развития весеннего комплекса диатомовых водорослей.

Трансформации соединений фосфора (рисунок 3.7) связаны с сезонной динамикой биомассы фитопланктона.

Максимальная концентрация фосфатов наблюдается в середине апреля ($\sim 6 \text{ мгР/м}^3$), что является следствием осенне-зимнего накопления фосфатов, связанного с поступлением из внешних источников и деструкционных процессов в водной толще и при отсутствии их убывания за счет потребления фитопланктоном. С началом вегетативного периода концентрация быстро снижается и остается на низком уровне (не выше 1 мгР/м^3) с середины мая до середины октября, что отражает интенсивное потребление фосфатов фитопланктоном в период активного роста. Небольшое повышение фосфатов в июне связано с началом развития недиатомового комплекса.

Детритный фосфор демонстрирует выраженный пик с середины мая по июнь (около $1,3 \text{ мгР/м}^3$), обусловленный отмиранием диатомовых водорослей. Вторичный, менее выраженный пик в первой декаде октября смещается и усиливается при учете весенней группы диатомей, что свидетельствует о влиянии сезонной структуры фитопланктона на трансформацию фосфора.

Лабильный растворенный фосфор достигает максимума в середине июня ($\sim 1,6 \text{ мР/м}^3$), что связано с активным обменом фосфора между биомассой и водной средой в период поздневесеннего прогрева и максимальной биологической активности.

Стоит отметить, что введение весенней группы диатомей привело к общему повышению концентраций всех форм фосфора, что указывает на более точное моделирование биологических процессов и циклов трансформации фосфора. Модель адекватно воспроизводит влияние сезонной изменчивости первичной продукции на биогеохимический цикл фосфора, при этом максимум продукции лимитируется доступностью фосфора, что соответствует олиготрофному статусу озера. Недиаомовый комплекс потребляет фосфор активнее диатомовых, что также учитывается в модели и влияет на сезонную динамику фосфорных форм [30].

Таким образом, модель эффективно отражает сезонные колебания различных форм фосфора, демонстрируя высокую чувствительность к биологическим и физико-химическим процессам, определяющим круговорот фосфора в экосистеме Онежского озера.

Результаты моделирования биогеохимических циклов для лимнологических районов Онежского озера без учета группы А1 и с ее включением представлены на рисунках 3.8-3.11, Б1-12. Осредненные значения также были рассчитаны для верхнего 2-метрового слоя. Далее проведен анализ этих районов с целью более детального выявления изменений в биогеохимических циклах при введении группы А1, а также оценки влияния различной степени антропогенной нагрузки на изменчивость продукции

В районах с высокой антропогенной нагрузкой, таких как Кондопожская и Петрозаводская губы, сезонная динамика первичной продукции отличается выраженной двухпиковой структурой (рисунок 3.8 и Б7). Весенний максимум, биомассы диатомовых водорослей здесь приходится на май — начало июня, около 25 мР/м^3 , что связано с ранним прогревом воды и поступлением биогенов со стоками, характерными для урбанизированных и промышленно

нагруженных территорий. В этот период продукция весеннего комплекса диатомовых достигает высоких значений, что подтверждается как модельными расчетами, так и натурными данными [30].

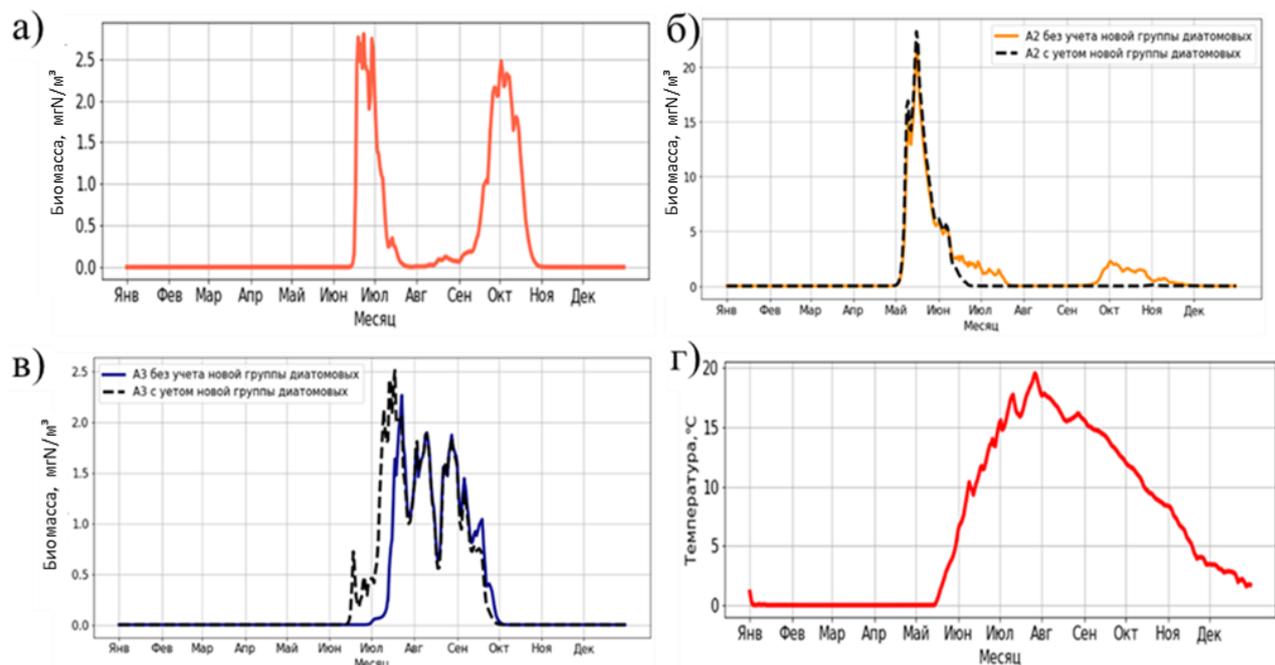


Рисунок 3.8 — Результаты моделирования сезонной изменчивости для Кондопожской губы Онежского озера: а) биомассы летнего комплекса диатомовых водорослей; б) биомассы весеннего комплекса диатомовых водорослей; в) биомассы комплекса недиадомовых; г) температуры поверхностного слоя воды

Летний максимум биомассы $2,5 \text{ mgN/m}^3$ формируется в июле, когда основную роль начинают играть недиадомовые водоросли, преимущественно зеленые и синезеленые, обладающие высокой фотосинтетической активностью и способностью быстро использовать доступный фосфор. В моделях SPBEM-2 для Кондопожской губы летний пик продукции недиадомовых может превышать $150 \text{ mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{сут})$, что согласуется с наблюдениями за последние десятилетия [30].

В отличие от губ, в Центральном Онего и других глубоководных районах (Большое Онего, Южное Онего) сезонная динамика биомассы выражена одновершинной кривой с максимумом в июле (рисунки 3.9, Б1,3). Здесь продукция формируется преимущественно за счет недиатомового комплекса, а весенний пик биомассы диатомовых ($0.4 \text{ мгN}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) или 80 выражен слабее, а также более короткий по сроку.

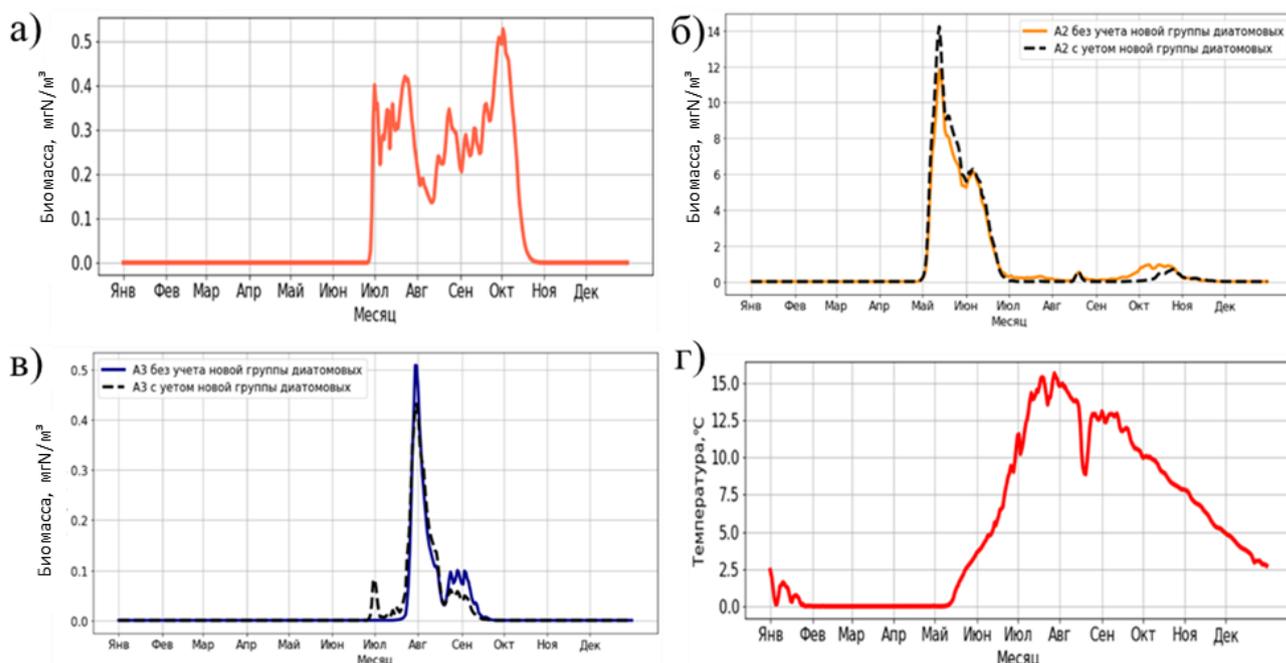


Рисунок 3.9 — Результаты моделирования сезонной изменчивости для района Центральное Онего: а) биомассы летнего комплекса диатомовых водорослей; б) биомассы весеннего комплекса диатомовых водорослей; в) биомассы комплекса недиатомовых; г) температуры поверхностного слоя воды

Среднемноголетние значения интегральной продукции в Центральном Онего составляют $137\text{--}154 \text{ мг C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ в июле, что полностью соответствует модельным данным и указывает на олиготрофный статус этих вод [31]. В летний период доля недиатомовых водорослей в общей биомассе фитопланктона достигает максимума, а диатомовые находятся в фазе

сезонного минимума, что подтверждается как модельными расчетами, так и результатами полевых наблюдений [31].

В районах, не испытывающих существенной антропогенной нагрузки, таких как Большое Онего, Южное Онего, Заонежский и Малое Онего, сезонная динамика биомассы фитопланктона в целом повторяет картину, характерную для Центрального Онего. Здесь также отмечается единственный летний максимум, обусловленный развитием недиатомовых водорослей, а весенний пик диатомовых выражен слабо. В Повенецком заливе, несмотря на относительную удаленность от крупных источников загрязнения, отмечается некоторое повышение продуктивности в летний период, что может быть связано с локальными особенностями гидрологии и поступлением биогенов с водосбора, однако эти изменения не столь выражены, как в губах.

В губах с высокой антропогенной нагрузкой (Кондопожская, Петрозаводская) (рисунок 3.11 и Б1,3) весенний максимум концентрации фосфатов наблюдается в апреле — начале мая и достигает около 8 мР/м^3 , что связано с поступлением биогенов после таяния льда и началом биологической активности. В дальнейшем, по мере развития фитопланктона, концентрация фосфатов быстро снижается до минимальных летних значений ($0,2 - 0,5 \text{ мР/м}^3$), что отражает интенсивное потребление фосфора в период массового цветения водорослей. В это же время наблюдается рост концентрации детритного фосфора, обусловленный разложением органического вещества и переходом фосфора в нерастворимую форму. Вторичный пик детритного фосфора приходится на осенний период, что связано с разрушением летнего фитопланктонного комплекса и активизацией процессов минерализации.

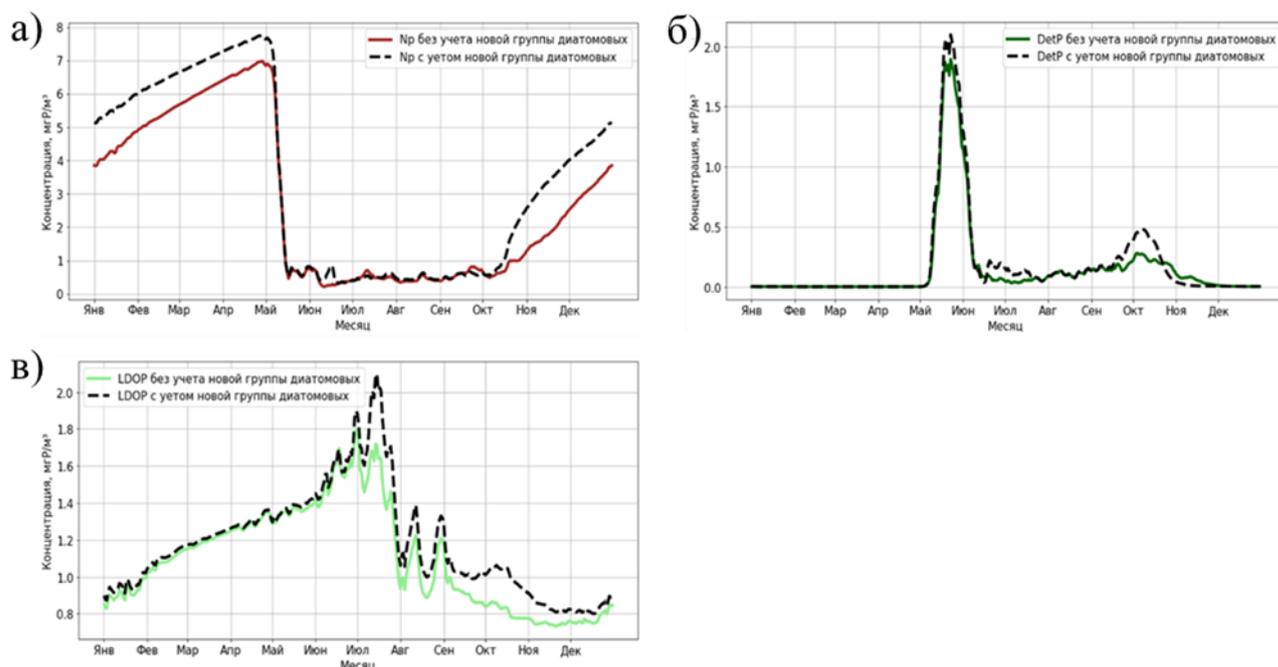


Рисунок 3.10 — Результаты моделирования сезонной изменчивости для Кондопожской губы Онежского озера: а) концентрации фосфатов; б) концентрации фосфора в детрите; в) концентрации лабильного растворенного фосфора

В фоновых районах (рисунок 3.11, Б2,4) сезонная динамика фосфора менее выражена: концентрация общего фосфора в течение всего вегетационного периода остается низкой, а сезонные колебания фосфатов и других форм фосфора сглажены. Максимум лабильного растворенного фосфора отмечается в июне (1,7 мгР/м³), что связано с активным обменом между биомассой и водной средой в период поздневесеннего прогрева. В целом, модель SPBEM адекватно воспроизводит влияние сезонной изменчивости первичной продукции на биогеохимический цикл фосфора, при этом максимум продукции лимитируется доступностью фосфора, что соответствует олиготрофному статусу озера [30].

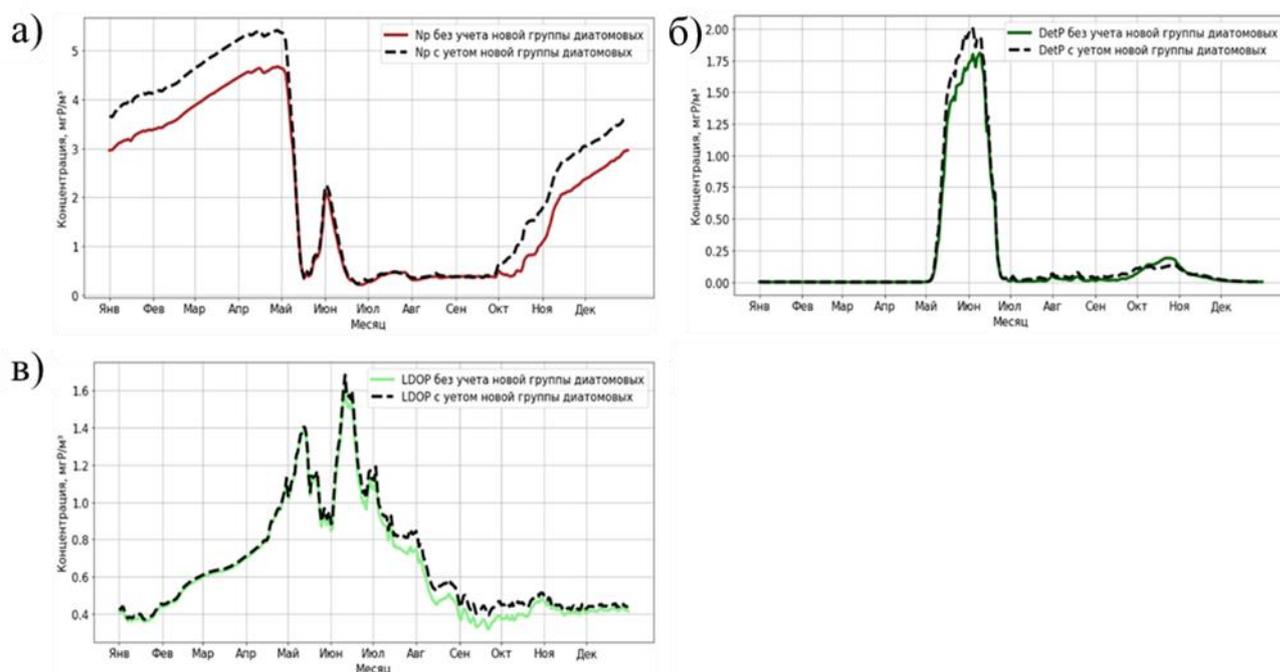


Рисунок 3.11 — Результаты моделирования сезонной изменчивости для района Центральное Онего: а) концентрации фосфатов; б) концентрации фосфора в детрите; в) концентрации лабильного растворенного фосфора

Сравнение районов с разной степенью антропогенной нагрузки показывает, что в губах (Кондопожская, Петрозаводская) средние и пиковые значения первичной продукции и концентраций биогенных элементов заметно выше, чем в центральных и глубоководных районах. Это связано с поступлением органики и биогенов со стоками промышленных предприятий и городов, что приводит к развитию эвтрофикации, увеличению доли недиаatomовых водорослей, а также к более выраженным сезонным колебаниям всех форм фосфора. В то же время, в последние годы в Кондопожской губе и других ранее эвтрофированных районах отмечается некоторое снижение биомассы и численности фитопланктона, а также увеличение доли крупноклеточных диатомовых, что может свидетельствовать о начальных признаках реолиготрофизации вследствие снижения точечной нагрузки [32]. Однако восстановление природного состояния планктона

возможно лишь при полном прекращении поступления биогенов, что пока не достигнуто.

В районах, не испытывающих антропогенного воздействия, уровень биопродуктивности остается стабильно низким, а сезонная динамика первичной продукции и фосфора определяется исключительно природными факторами — температурой воды, световым режимом, гидрологическими особенностями. Здесь максимум продукции формируется в июле, а сезонные колебания фосфора сглажены, что подтверждает олиготрофный статус этих водоемов и их высокую устойчивость к внешним воздействиям.

Таким образом, анализ расчетов модели SPBEM-2 для различных лимнических районов Онежского озера показывает, что введение летних диатомовых позволило более точно отразить особенности сезонной динамики продукции и трансформации фосфора, а также выявить ключевые различия между районами с высокой и низкой антропогенной нагрузкой. В губах наблюдается выраженная двухпиковая структура продукции и более высокая концентрация всех форм фосфора, что связано с поступлением биогенов и развитием эвтрофикации. В центральных и глубоководных районах сезонная динамика продукции и фосфора сглажена, а уровень биопродуктивности остается низким, что соответствует олиготрофному статусу озера. Модельные данные хорошо согласуются с натурными наблюдениями, что подтверждает их применимость для оценки состояния экосистемы и прогнозирования последствий как природных, так и антропогенных изменений.

В дополнение к рассмотренному выше анализу сезонной динамики концентраций биогенных элементов и первичной продукции фитопланктона, для более детальной оценки различий в степени антропогенной нагрузки на интенсивность биогеохимических процессов в разных частях водоема было рассмотрено пространственное распределение среднегодовых потоков веществ и продуктивности по лимнологическим районам Онежского озера (рисунок 3.12).

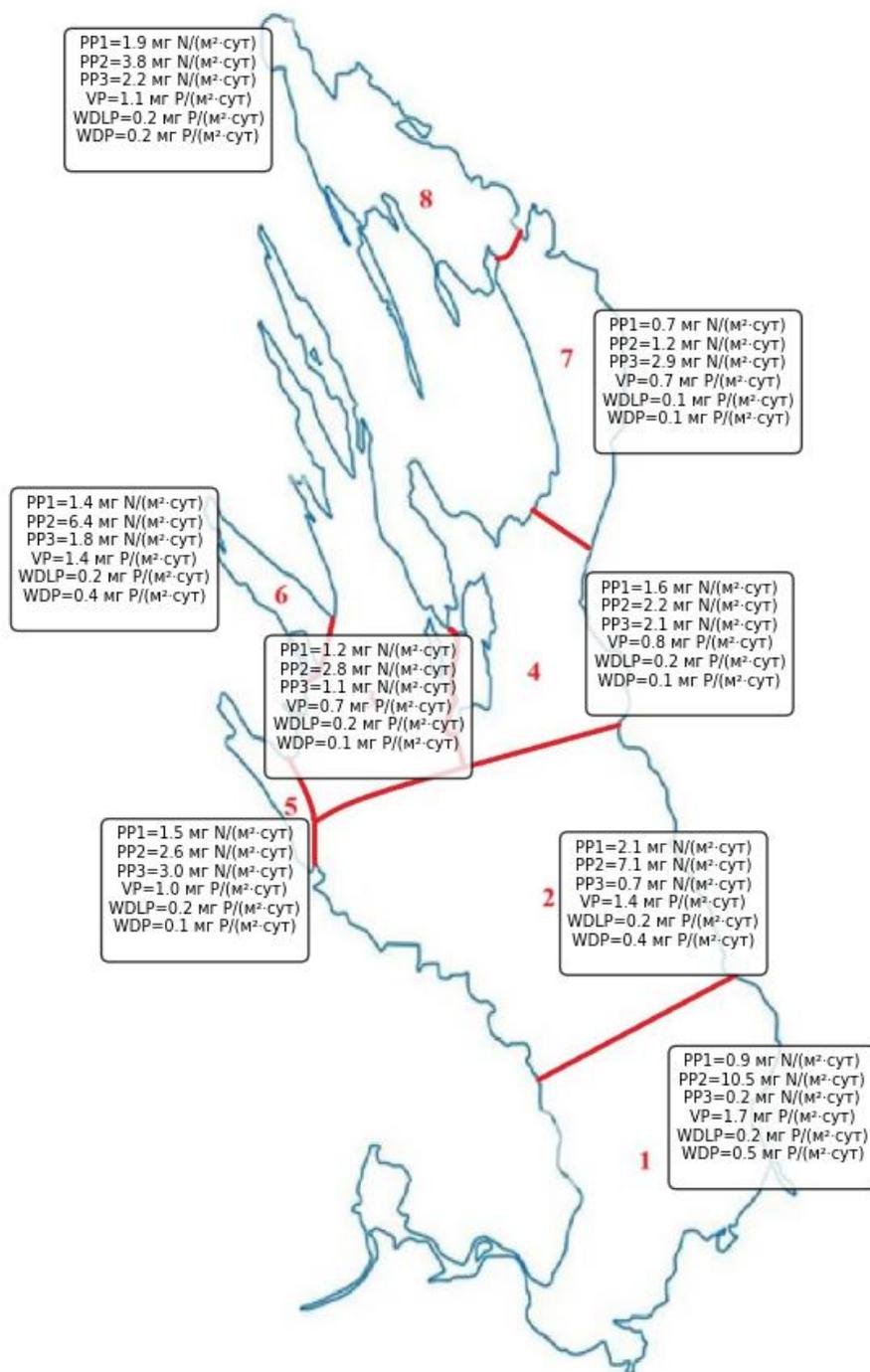


Рисунок 3.12 — Результаты модельных расчетов среднегодовых потоков веществ и продуктивности по лимническим районам Онежского озера

В результате были выявлены существенные различия между районами с высокой и низкой антропогенной нагрузкой. Так, в губах, испытывающих

значительное воздействие хозяйственной деятельности (Кондопожская и Петрозаводская губы), отмечаются повышенные значения потоков как первичной продукции, так и процессов минерализации и трансформации фосфора [33]. Например, в Кондопожской губе значения весенней продукции диатомовых (PP2) достигают 6.4 мг N/(м²·сут), а разрушение детрита (WDP) — 0.4 мг P/(м²·сут), что существенно выше по сравнению с глубоководными районами (например, Заонежский залив: PP2 = 1.2 мг N/(м²·сут), WDP = 0.06 мг P/(м²·сут)). В Петрозаводской губе также фиксируются высокие значения летней и весенней продукции диатомовых (PP1 = 1.5, PP2 = 2.6 мг N/(м²·сут)), что свидетельствует о двухпиковой структуре продукционного процесса, характерной для районов с интенсивным поступлением биогенных элементов [34].

В глубоководных и удаленных от источников загрязнения районах (Большое Онего, Заонежский залив) значения потоков первичной продукции и минерализации фосфора ниже и более сбалансированы. Например, в Большом Онего значения PP1, PP2 и PP3 составляют соответственно 1.2, 2.8 и 1.1 мг N/(м²·сут), а потоки, связанные с фосфором — VP = 0.7, WDLP = 0.2, WDP = 0.01 мг P/(м²·сут). Это подтверждает олиготрофный статус этих районов и их высокую устойчивость к внешним воздействиям.

Особое внимание заслуживает анализ потоков недиадомовых водорослей (PP3), которые обеспечивают основной вклад в летний максимум продукции во всех районах. Значения PP3 варьируют от 0.7 до 3.0 мг N/(м²·сут), что согласуется с предыдущим анализом сезонной динамики концентраций и подтверждает роль недиадомовых как главных продуцентов в период максимальной биологической активности.

Потоки, отражающие процессы трансформации органического фосфора (WDLP, WDP), также демонстрируют пространственную неоднородность. Максимальные значения минерализации лабильного органического фосфора (WDLP) и разрушения детрита (WDP) отмечены в

районах с высокой продуктивностью и антропогенной нагрузкой, что указывает на ускорение биогеохимических циклов в условиях эвтрофикации.

Сравнение районов с разной степенью антропогенного воздействия позволяет заключить, что в губах и заливах, испытывающих влияние стоков и урбанизации, наблюдается интенсификация всех биогеохимических процессов — как продукционных, так и деструктивных [33;35]. В то же время в глубоководных и слабо трансформированных районах сохраняется низкий уровень биопродуктивности и сбалансированность потоков, что подтверждает их олиготрофный статус [36].

В целом, пространственный анализ модельных потоков подтверждает выводы, полученные при рассмотрении сезонной динамики концентраций биогенных элементов: районы с высокой антропогенной нагрузкой характеризуются более высокими значениями потоков первичной продукции и интенсивными процессами трансформации фосфора, тогда как в фоновых районах отмечается стабильность и низкая интенсивность биогеохимических процессов [30;34]. Это свидетельствует о высокой чувствительности экосистемы Онежского озера к внешним воздействиям и необходимости продолжения мониторинга и моделирования для оценки последствий антропогенных изменений.

3.3 Оценка вклада в первичную продукцию летних диатомовых водорослей

По результатам моделирования, представленного на рисунках 3.13–3.15, летние диатомовые водоросли вносят заметный вклад в суммарную биомассу фитопланктона за вегетационный период (май-октябрь) по всей акватории Онежского озера (суммарный вклад биомассы летней группы составил 14 %.) Включение этой группы приводит к увеличению общей биомассы, что хорошо видно при сравнении графиков «без учета» и «с учетом» летних диатомовых: по всей акватории вклад летней группы выражен, но не доминирует.

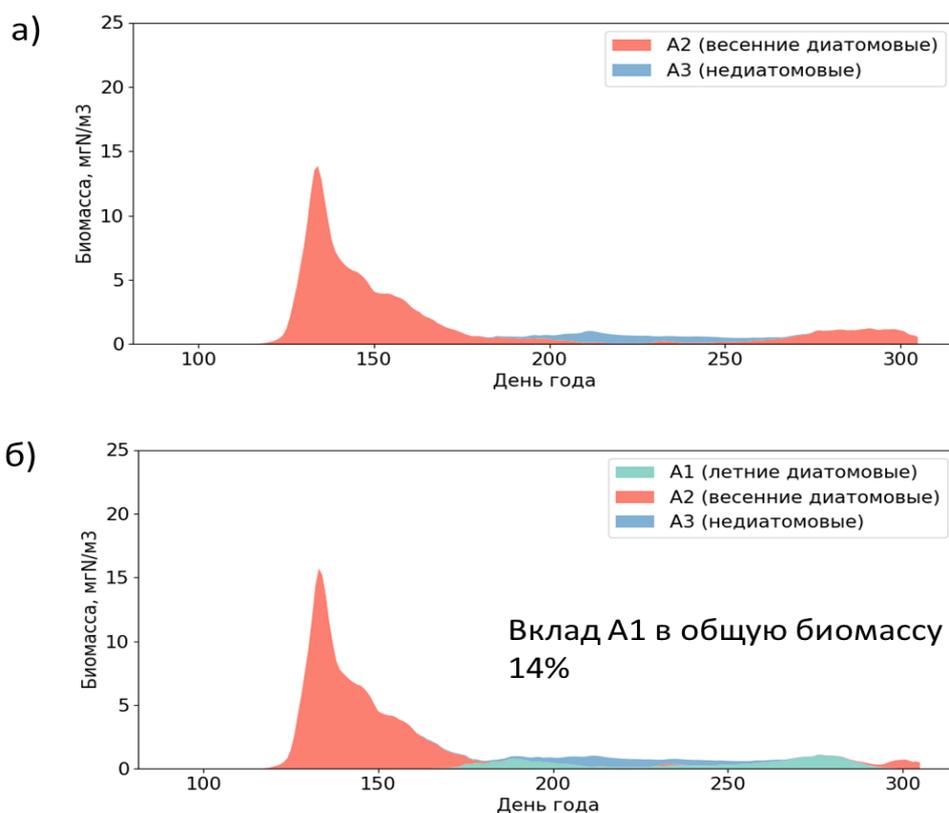


Рисунок 3.13 Суммарная биомасса фитопланктона за вегетационный период Онежское озеро: а) без учета летней группы диатомовых водорослей; б) с учетом летней группы диатомовых

В районах с высокой антропогенной нагрузкой, прежде всего в Кондопожской губе, влияние летних диатомовых становится более существенным (18%): их развитие приводит к заметному увеличению суммарной биомассы фитопланктона в летний период, что отражено на соответствующем рисунке.

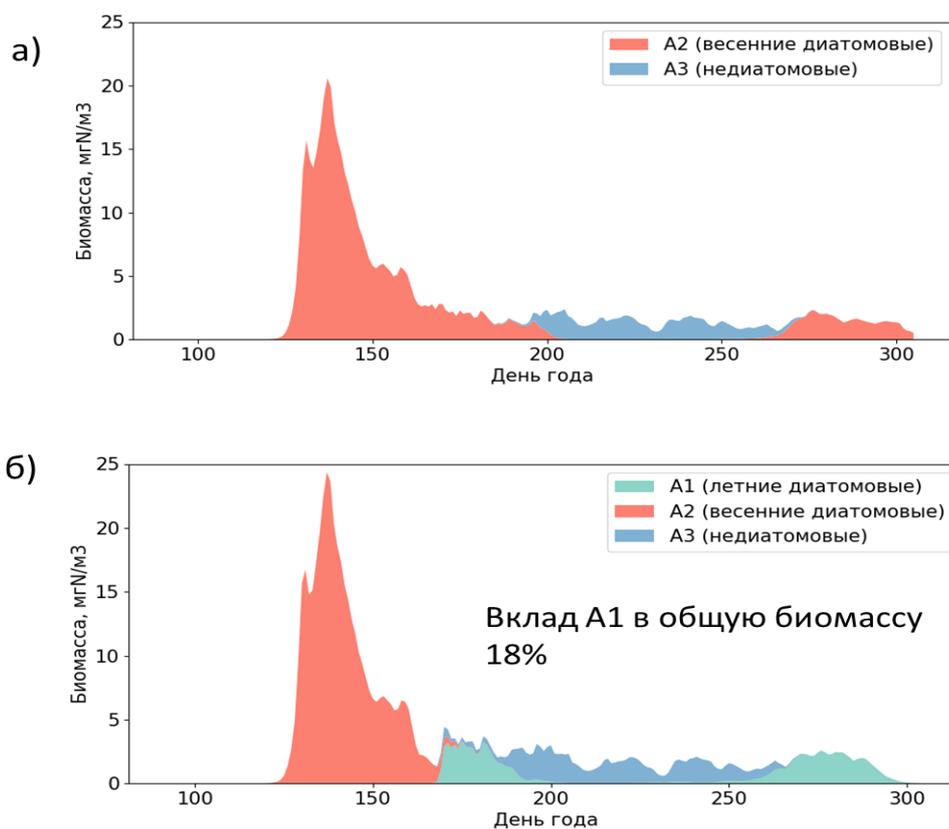


Рисунок 3.14 Суммарная биомасса фитопланктона за вегетационный период Кондопожская губа: а) без учета летней группы диатомовых водорослей; б) с учетом летней группы диатомовых

В районах с низкой антропогенной нагрузкой, таких как Центральное Онего, вклад летних диатомовых в общую биомассу ограничен, и основная продукция формируется за счет других групп фитопланктона. Суммарный вклад летних диатомовых за весь вегетационный период составил 12 %.

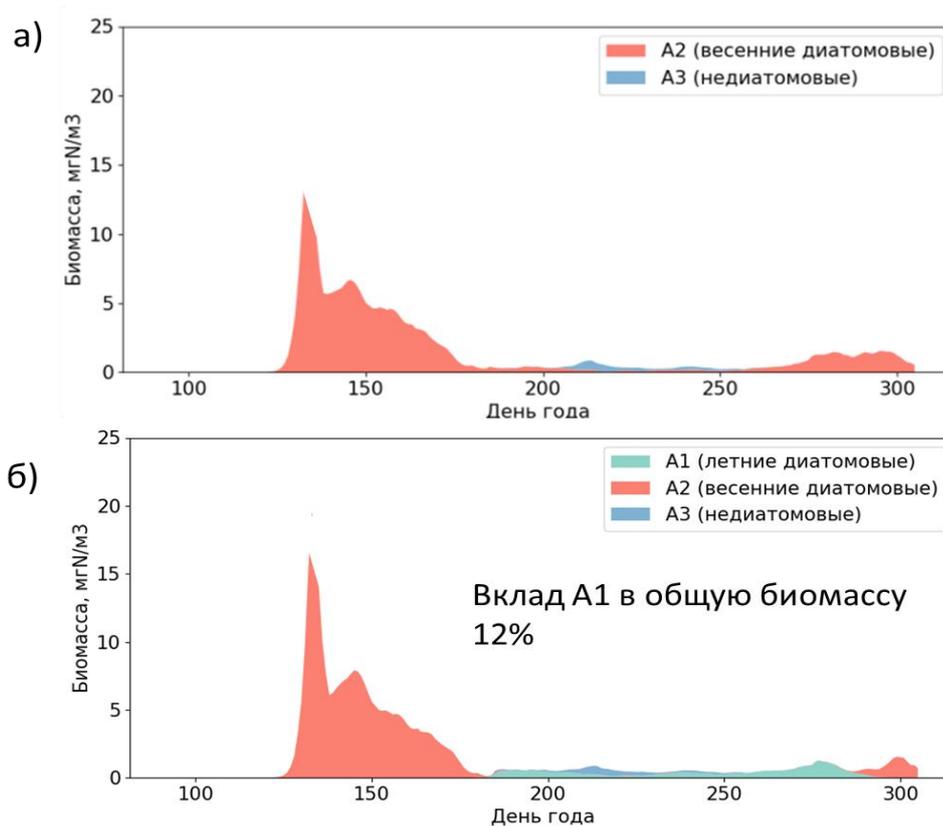


Рисунок 3.15 Суммарная биомасса фитопланктона за вегетационный период Центральное Онего: а) без учета летней группы диатомовых водорослей; б) с учетом летней группы диатомовых

Таким образом, наибольший вклад летних диатомовых фиксируется именно в губах и прибрежных зонах, подверженных внешнему воздействию, тогда как в открытых и слабо трансформированных районах их роль менее значительна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была проведена оценка вклада весеннего и летнего цветения фитопланктона в годовую первичную продукцию Онежского озера с помощью математического моделирования. В процессе исследования были реализованы все поставленные задачи: дана характеристика современного состояния озера, приведена характеристика сообщества диатомовых водорослей, а также проведён анализ сезонной и пространственной динамики первичной продукции в разных районах водоёма. Особое внимание уделялось влиянию летней группы диатомовых водорослей, которая была впервые интегрирована в модель для более точного отражения сезонных процессов.

Результаты моделирования показали, что включение летних диатомовых позволяет выявить дополнительные особенности формирования биомассы фитопланктона, особенно в районах с выраженной антропогенной нагрузкой. Их вклад в структуру первичной продукции становится особенно заметен в губах озера, где наблюдается двухпиковая сезонная динамика и значительное увеличение суммарной биомассы в летний период. В центральных и глубоководных районах роль летних диатомовых менее выражена, однако их учёт важен для корректной оценки продукционных процессов и понимания экосистемных изменений.

Таким образом, проведённая работа подтвердила значимость учёта сезонного разнообразия фитопланктона при анализе биогеохимических циклов и продуктивности Онежского озера. Включение летней группы диатомовых водорослей в расчёты позволяет более объективно оценивать влияние внешних факторов на динамику первичной продукции и формировать научно обоснованные рекомендации для экологического мониторинга и управления состоянием акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теканова Е.В. Первичная продукция Онежского озера в современных условиях: Автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. СПб., 2004. 23 с.
2. Исаев А.В., Савчук О.П., Филатов Н.Н. Трехмерная ретроспективная оценка биогеохимической динамики азота и фосфора в экосистеме Онежского озера за период с 1985 по 2015 гг. Часть I: Межгодовая изменчивость и пространственное распределение. Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022;15(2):76-97.
3. Антропогенные факторы влияния на экосистему водоёма Онежское озеро и водные ресурсы его бассейна. – URL: <https://www.pierredubochet.ch/files/-----Onega.htm>
4. Филатов, Н. Н. Онежское озеро // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал – URL: <https://bigenc.ru/c/onezhskoe-ozero-b7d465/?v=9476300> (дата публикации: 03.05.2023; дата обновления: 15.01.2024; дата обращения: 18.11.2024).
5. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / [Т. В. Ефремова, Н. В. Альтшуллер, Т. Е. Гершензон и др.]; Под ред. З. С. Кауфмана; АН СССР, Карел. фил., Отд. вод. пробл. - Ленинград : Наука : Ленингр. отделение, 1990. - 264 с.
6. Игнатов Евгений Иванович, Борщенко Евгения Вадимовна, Загоскин Алексей Леонидович, Землянов Игорь Владимирович, Санин Александр Юрьевич, Терский Павел Николаевич, Фатхи Михаил Олегович Связь геологического строения побережья, истории развития рельефа и динамики берегов Онежского озера // Труды КарНЦ РАН. 2017. №3.
7. Беляев Павел Юрьевич, Рыбалко Александр Евменьевич, Субетто Дмитрий Александрович, Зобков Михаил Борисович, Фёдоров Григорий Борисович ЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ И РЕЛЬЕФ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА // Географический вестник. 2021. №1 (56).

8. Алёшин М.И., Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Миринец А.К., Субетто Д.А., Токарев М.Ю. Особенности геоморфологического строения Петрозаводской губы Онежского озера по данным гидро- и сейсмоакустических наблюдений // Сейсмические приборы. 2024. Т. 60, № 3. С.77–92.
9. Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Сабылина А.В., Рыжаков А.В. Изменения гидрохимического режима Онежского озера с начала 1990-х годов. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2019;(1):62-72.
10. Галахина Наталия Евгеньевна, Зобков Михаил Борисович ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ФОРЕЛЕВЫХ ХОЗЯЙСТВ В КОНДОПОЖСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД 2022 ГОДА // Труды КарНЦ РАН. 2022. №6.
11. Куликова Алёна Викторовна, Горбунов Олег Вячеславович, Конышева Елена Николаевна Экологическая характеристика гидрохимического качества площадей водосбора Онежского озера и управление стоками // Символ науки. 2016. №7-2.
12. Грязные губы Онежского озера // Официальный интернет-портал Республики Карелия. – URL: <https://rk.karelia.ru/special-projects/uchenyj-sovet/gryaznye-guby-onego/> (дата обращения: 06.06.2025).
13. Сбор данных о качестве воды и состоянии очистных сооружений в Онежском и Ладожском озёрах завершится до конца года // Информационное агентство ТАСС. – URL: <https://tass.ru/obschestvo/15290573> (дата обращения: 06.06.2025).
14. Теканова Е.В., Калинкина Н.М., Макарова Е.М., Смирнова В.С. Современное трофическое состояние и качество воды Онежского озера // Биология внутренних вод. 2023. № 6. С. 740–746.
15. Ежегодник качества поверхностных вод Российской Федерации за 2023 год с приложением / Федеральная служба по гидрометеорологии и

мониторингу окружающей среды, ФГБУ "Гидрохимический институт". – Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт, 2024. – 456 с.

16. Меншуткин Владимир Васильевич, Руховец Леонид Айзикович, Филатов Николай Николаевич МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ОЗЕР // ВХР. 2014. №3.

17. Меншуткин, В. В. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 2. Модели экосистем пресноводных озер / В. В. Меншуткин, Л. А. Руховец, Н. Н. Филатов // Водные ресурсы. – 2014. – Т. 41, № 1. – С. 24. – DOI 10.7868/S0321059614010088. – EDN RPSCGL.

18. Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., Ryabchenko V., Savchuk O. Accounting for Dissolved Organic Nutrients in an SPBEM-2 Model: Validation and Verification // Water. 2020. Vol. 12. № 5. P. 1307.

19. Isaev, A. & Ryabchenko, Vladimir & Konik, Aleksandr. (2024). Reproduction of the Current Climatic State of the Lake Ladoga Ecosystem. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 17. 50-65. 10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5.

20. Савчук О.П., Исаев А.В., Филатов Н.Н. Трехмерная ретроспективная оценка биогеохимической динамики азота и фосфора в экосистеме Онежского озера за период с 1985 по 2015 гг. Часть II: Сезонная динамика и пространственные особенности; интегральные потоки // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15. № 2. С. 98–109.

21. Владимирова О.М., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Рябченко В.А., Савчук О.П. Моделирование растворенного органического вещества в Финском заливе. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018;11(4):90-101

22. Kelly, Samuel M. (2024). Materials to re-create Predicting Surface Oscillations in Lake Superior from Normal Mode Dynamics. Retrieved from the Data Repository for the University of Minnesota (DRUM), <https://doi.org/10.13020/t222-a012>.

23. Pilcher, Darren & Mckinley, Galen & Bootsma, Harvey & Bennington, Val. (2015). Physical and biogeochemical mechanisms of internal carbon cycling in Lake Michigan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 120. 10.1002/2014JC010594.

24. Чекрыжева, Татьяна & Chekryzheva, T.. (2015). DIATOMS IN THE PLANKTON OF LAKE ONEGO. *Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 110. 10.17076/bg10.

25. Чекрыжева Татьяна Александровна Таксономическая и экологическая характеристика фитопланктона Онежского озера // Труды КарНЦ РАН. 2012. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/taksonomicheskaya-i-ekologicheskaya-harakteristika-fitoplanktona-onezhskogo-ozera> (дата обращения: 06.06.2025).

26. Dusan Losic, James G. Mitchell, Nicolas H. Voelcker. *Diatomaceous Lessons in Nanotechnology and Advanced Materials*. *Advanced Materials*. 2009. Vol. 21. P. 2947–2958.

27. Diatoms of North America [Электронный ресурс]. – URL: <https://diatoms.org> (дата обращения: 06.06.2025).

28. Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., et al. Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: Validation and verification. *Water*. 2020, 12, 5, 1307. doi:10.3390/w12051307

29. Lozovik P.A., Borodulina G.S., Karpechko Y.V., et al. Nutrient load on Lake Onego according to field data. *Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2016, 5, 35–52 (in Russian). doi:10.17076/lim303

30. Сярки М.Т., Теканова Е.В. Сезонный цикл первичной продукции в Онежском озере // *Известия РАН. Серия биологическая*. 2008. № 5. С. 621–625.

31. Теканова Е.В., Сярки М.Т. Особенности фенологии первично-продукционного процесса в пелагиали Онежского озера // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2015. № 6. С. 787–796.

32. Калинкина Наталия Михайловна, Теканова Елена Валентиновна, Сярки Мария Тагевна ЭКОСИСТЕМА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА: РЕАКЦИЯ ВОДНЫХ СООБЩЕСТВ НА АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ // ВХР. 2017. №1.

33. Теканова Е. В., Коросов А. В., Калинкина Н. М., Исакова К. В., Рыжаков А. В. Модель перераспределения веществ в водах Петрозаводской губы Онежского озера // Принципы экологии. 2020. № 2. С. 97–110.

34. Тимакова Тамара Михайловна, Сабылина Альбина Васильевна, Полякова Тамара Николаевна, Сярки Мария Тагиевна, Теканова Елена Валентиновна, Чекрыжева Татьяна Александровна Современное Состояние экосистемы Онежского озера и тенденции ее изменения за последние десятилетия // Труды КарНЦ РАН. 2011. №4.

35. Галахина Н.Е., Сабылина А.В., Зобков М.Б. Современная речная биогенная нагрузка на Онежское озеро // Известия Русского географического общества. 2024. Т. 156. № 1. С. 87–97.

36. Теканова Е.В. Первичная продукция Онежского озера в современных условиях: Автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. СПб, 2004. 23 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Программный код модуля осреднения данных в программном пакете Python.

```
import os
import numpy as np
import netCDF4
from modelclass import *
import matplotlib.pyplot as plt

path_to_result = 'D:/Result_new/'
grid_file = os.path.join(path_to_result, 'grid.nc')

grid = Grid(grid_file)

def load_variable(var_name, folder_path):

    for filename in os.listdir(folder_path):
        if filename.endswith('.nc'):
            file_path = os.path.join(folder_path, filename)
            with netCDF4.Dataset(file_path, 'r') as nc:
                if var_name in nc.variables:
                    data = np.array(nc.variables[var_name][:])
                    print(f"Переменная '{var_name}' загружена из файла
'{filename}'")
                    return data
            raise ValueError(f"Переменная '{var_name}' не найдена ни в одном файле
папки '{folder_path}'")

def calculate_surface_weighted_average_time_series(var_name):

    var_data = load_variable(var_name, path_to_result)
    try:
        eta = load_variable('ETAtave', path_to_result)
    except ValueError:
        eta = load_variable('Eta', path_to_result)

    # выбрала поверхность
    surface_layer = 0
    water_mask = (grid.HFacC[surface_layer] == 1)

    ntime = var_data.shape[0] # число временных шагов
    average_series = np.full(ntime, np.nan) # массив для результата

    dr_layer = grid.drF[surface_layer]
    depth_masked = grid.Depth[water_mask]
    area_masked = grid.rA[water_mask]

    for t in range(ntime):
        # Данные концентрации на поверхности в момент времени t
        surface_conc = var_data[t, surface_layer, :, :][water_mask]
        # Уровень воды в момент времени t
        eta_masked = eta[t][water_mask]
        # толщина слоя с учетом дзеты
        cell_thickness = dr_layer * (1 + eta_masked / depth_masked)
        # Объем ячейки
        cell_volume = area_masked * cell_thickness

    total_mass = np.nansum(surface_conc * cell_volume)
```

```

total_volume = np.nansum(cell_volume)

if total_volume != 0:
    average_series[t] = total_mass / total_volume
else:
    average_series[t] = np.nan
    print(f"Время {t}: суммарный объем равен нулю, расчет
невозможен")

return average_series

average_np_series = calculate_surface_weighted_average_time_series('Np')

plt.plot(average_np_series)
plt.xlabel('Время')
plt.ylabel('Средняя концентрация Np, мгР/м³')
plt.show()

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Результаты моделирования для лимнических районов Онежского озера

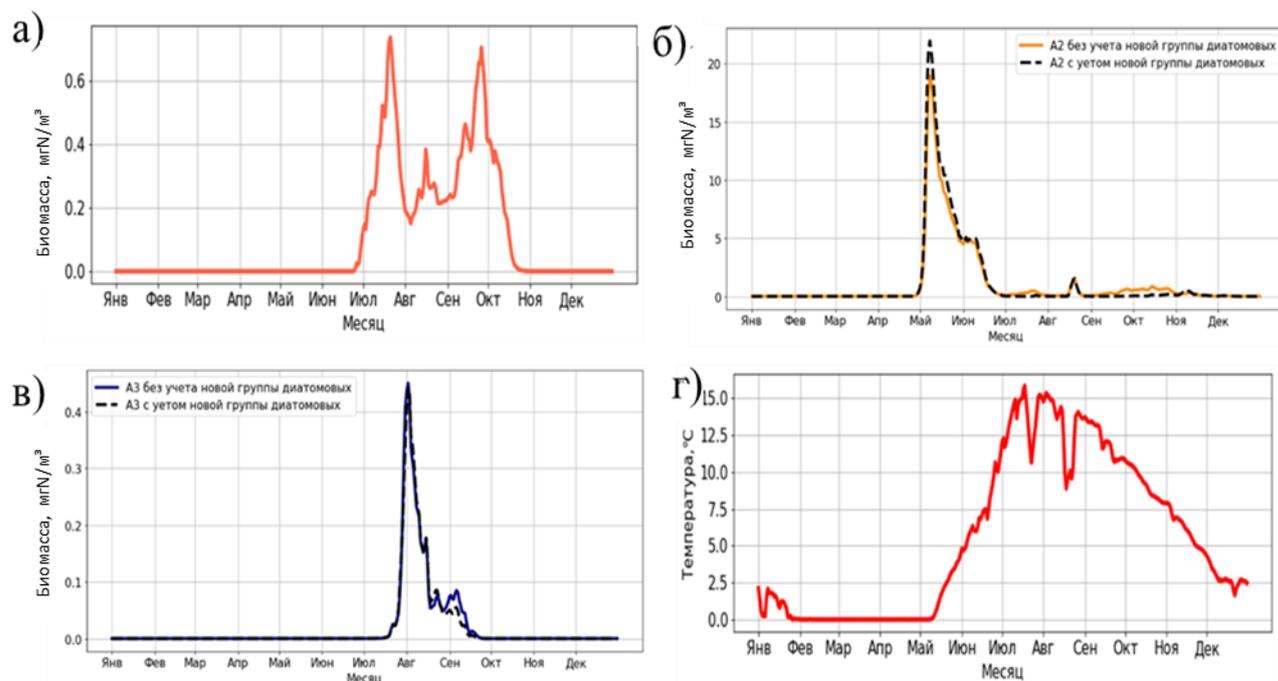


Рисунок Б1 — Результаты моделирования для района Южное Онего: а) биомассы летнего комплекса диатомовых водорослей; б) биомассы весеннего комплекса диатомовых водорослей; в) первичной продукции комплекса недиатомовых; г) температуры поверхностного слоя воды

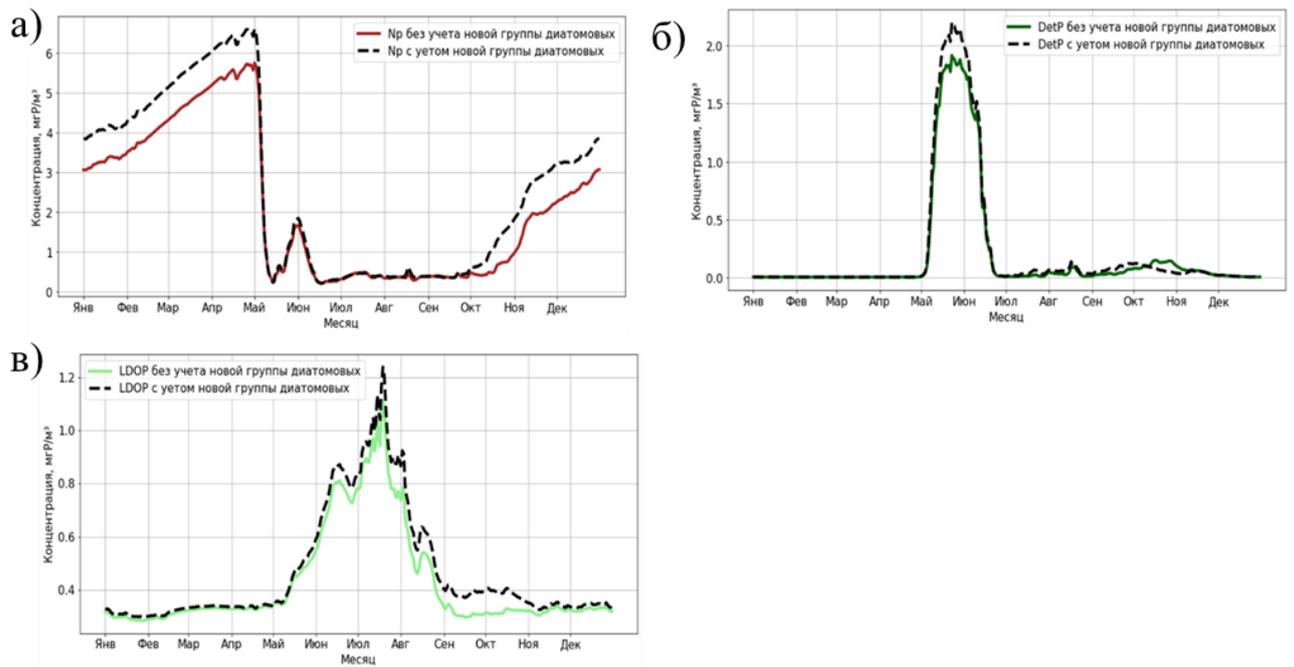


Рисунок Б2 — Результаты моделирования для района Южное Онего
 а) сезонная динамика концентрации фосфатов; б) сезонная динамика концентрации фосфора в детрите; в) сезонная динамика концентрации лабильного растворенного фосфора

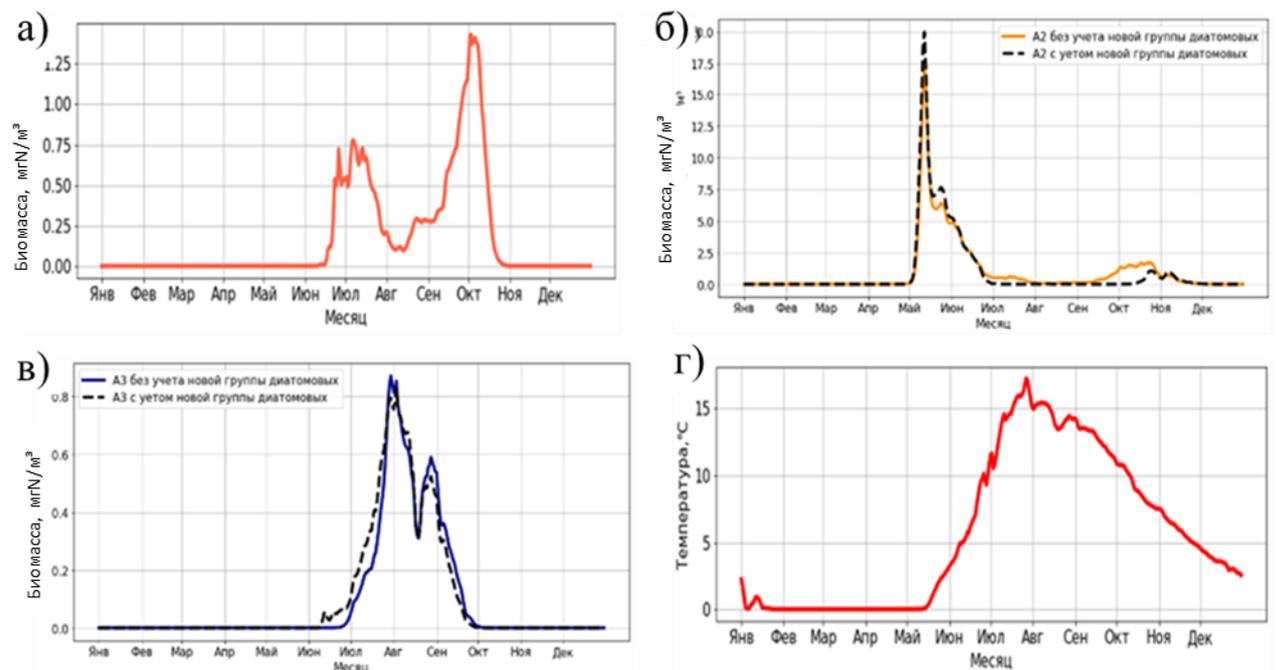


Рисунок Б3 — Результаты моделирования для района Большое Онего: а) биомассы летнего комплекса диатомовых водорослей; б) биомассы весеннего комплекса диатомовых водорослей; в) первичной продукции комплекса недиатомовых; г) температуры поверхностного слоя воды

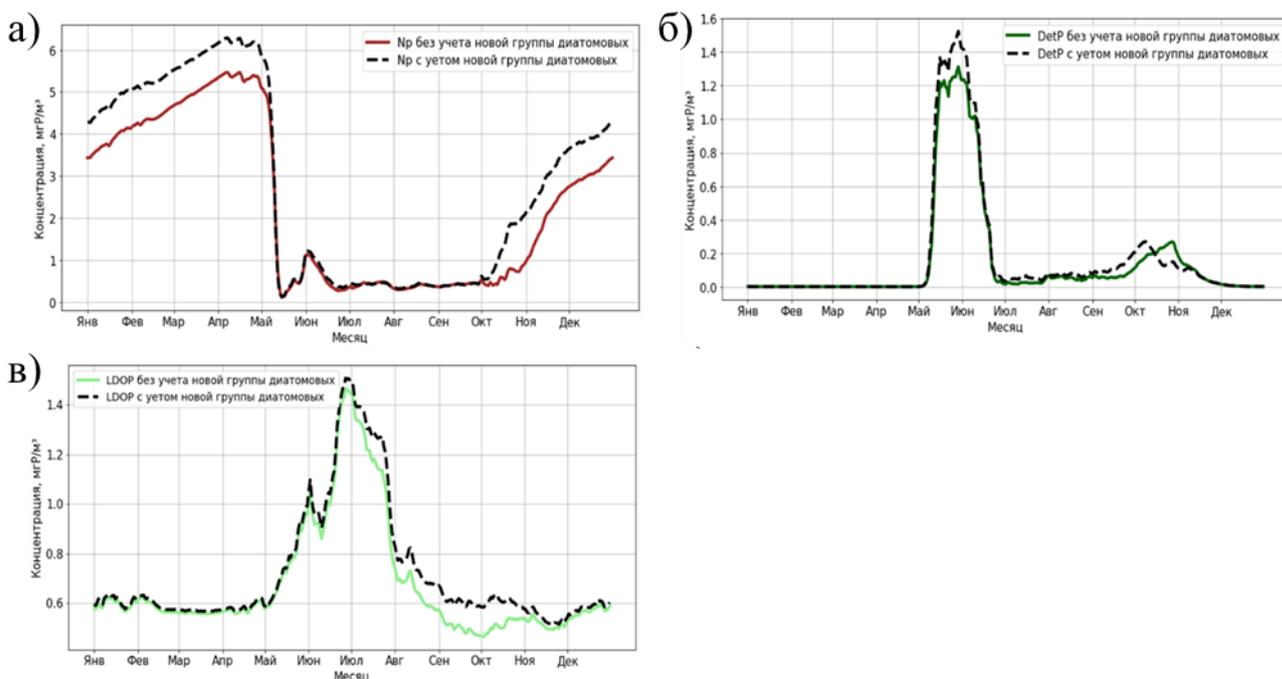


Рисунок Б4 — Результаты моделирования для района Большое Онего: а) сезонная динамика концентрации фосфатов; б) сезонная динамика концентрации фосфора в детрите; в) сезонная динамика концентрации лабильного растворенного фосфора

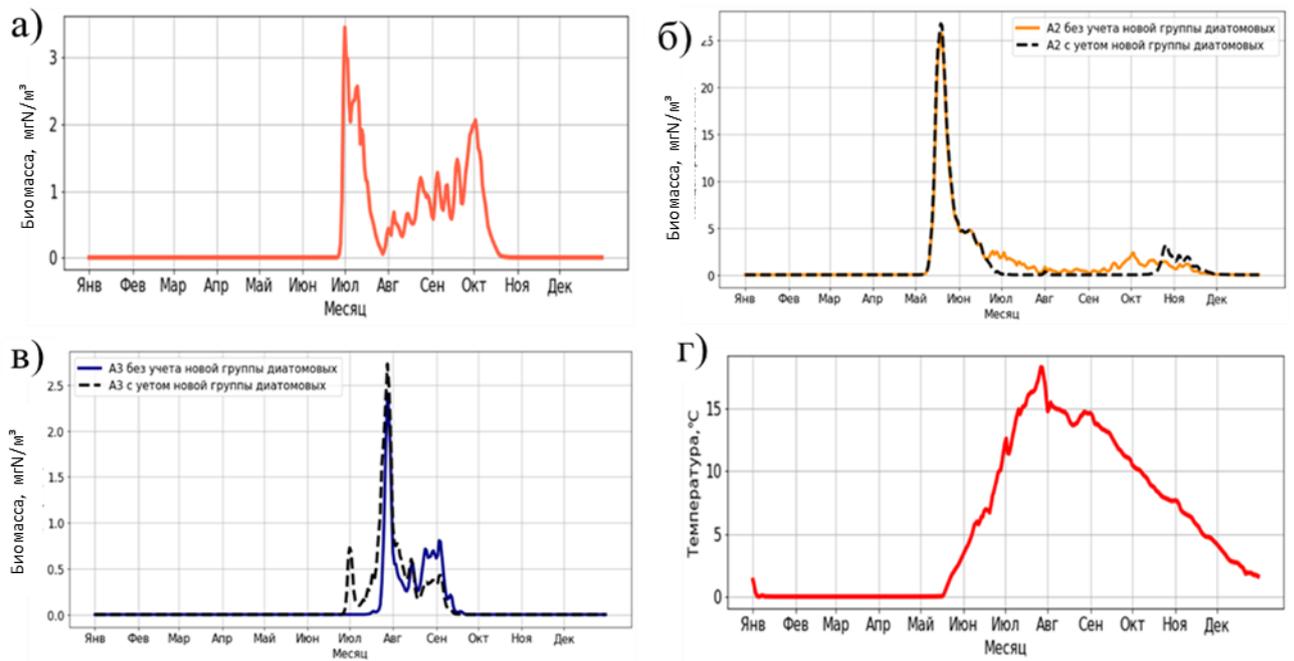


Рисунок Б5 — Результаты моделирования для района Малое Онего: а) биомассы летнего комплекса диатомовых водорослей; б) биомассы весеннего комплекса диатомовых водорослей; в) первичной продукции комплекса недиатомовых; г) температуры поверхностного слоя воды

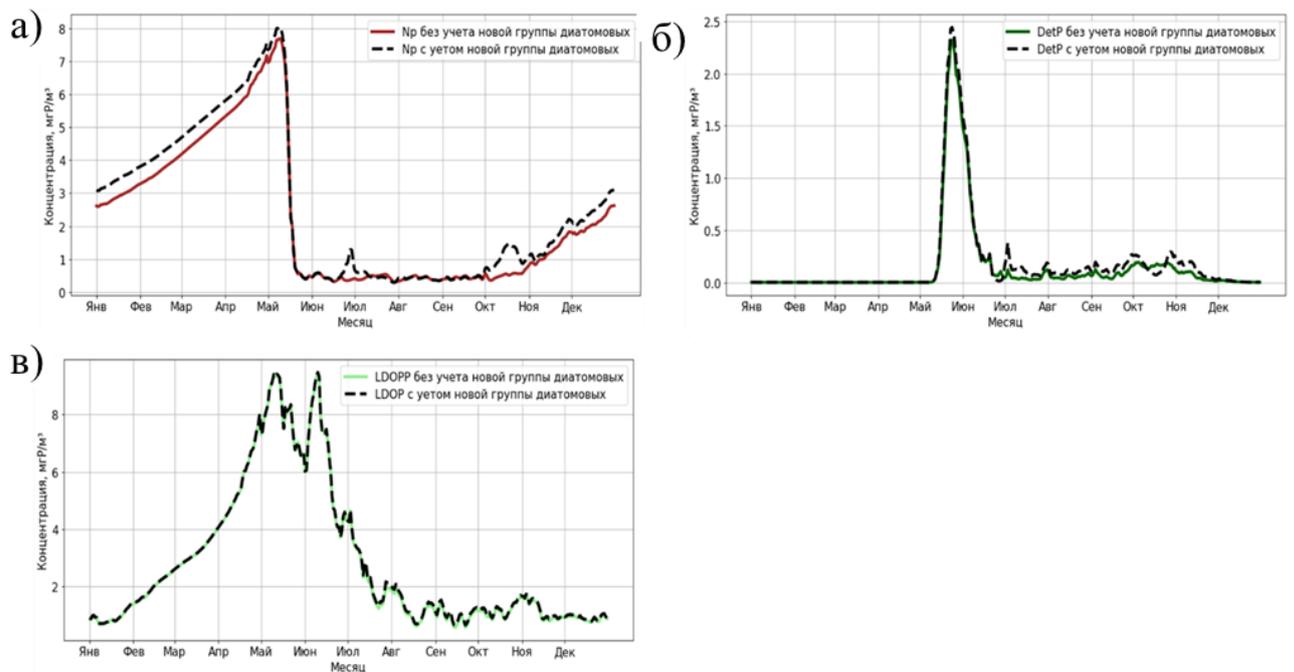


Рисунок Б6 — Результаты моделирования для района Малое Онего: а) сезонная динамика концентрации фосфатов; б) сезонная динамика концентрации фосфора в детрите; в) сезонная динамика концентрации лабильного растворенного фосфора

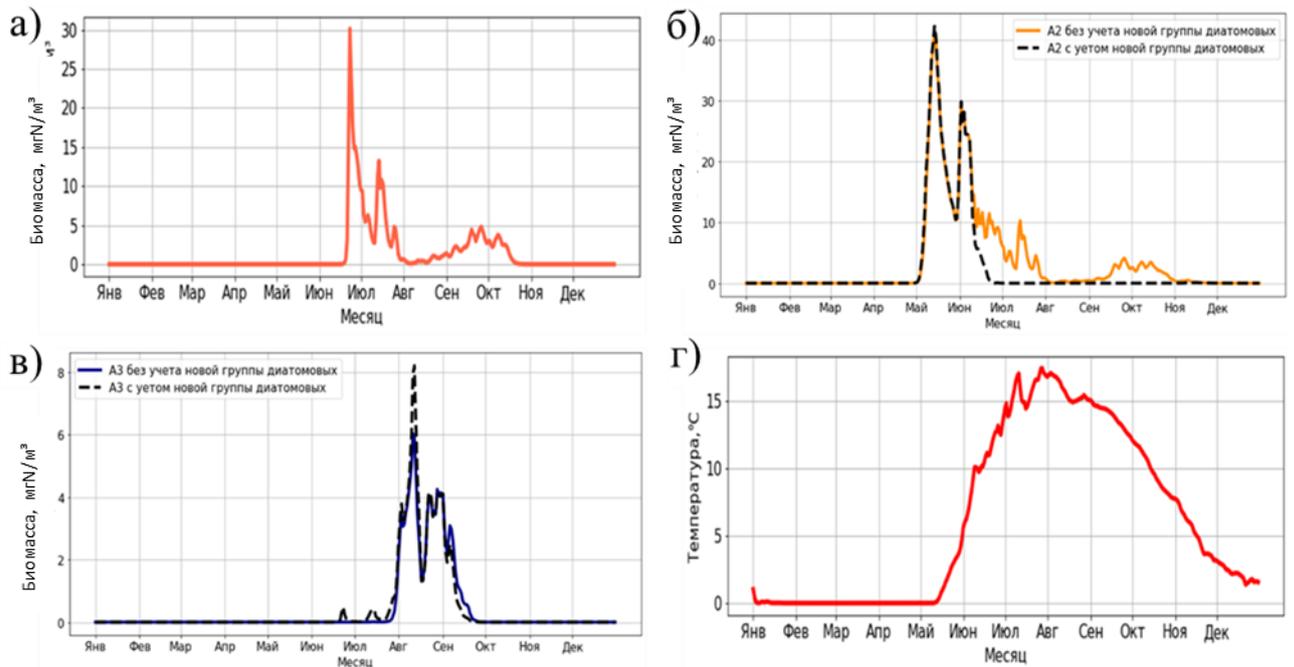


Рисунок Б7 — Результаты моделирования для Петрозаводской губы Онежского озера: а) биомассы летнего комплекса диатомовых водорослей; б) биомассы весеннего комплекса диатомовых водорослей; в) первичной продукции комплекса недиатомовых; г) температуры поверхностного слоя ВОДЫ

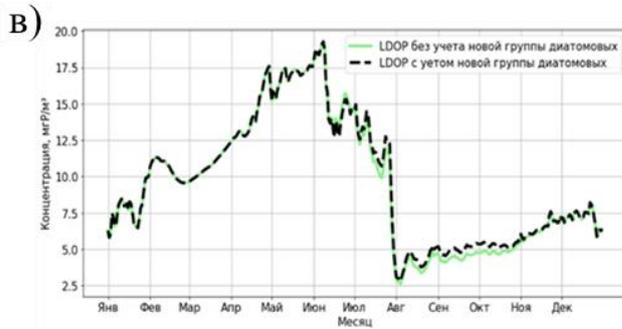
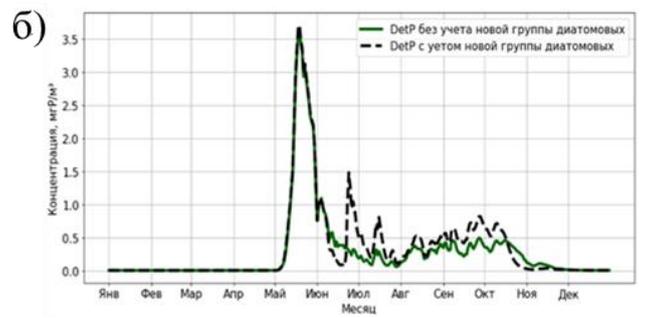
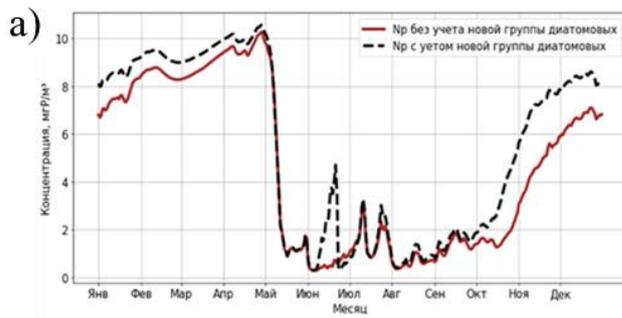


Рисунок Б8 — Результаты моделирования для Петрозаводской губы Онежского озера: а) сезонная динамика концентрации фосфатов; б) сезонная динамика концентрации фосфора в детрите; в) сезонная динамика концентрации лабильного растворенного фосфора

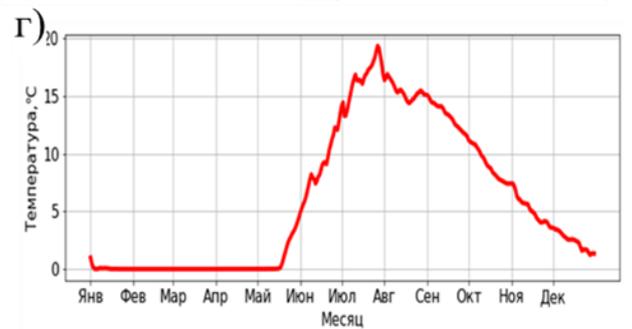
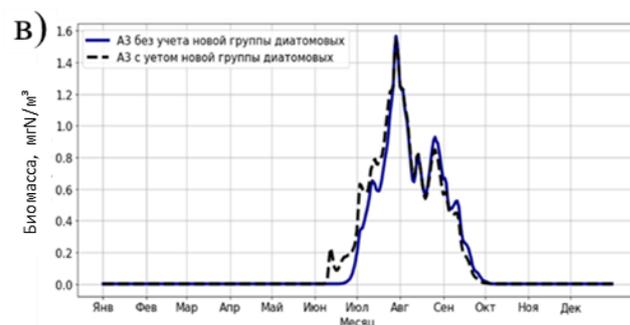
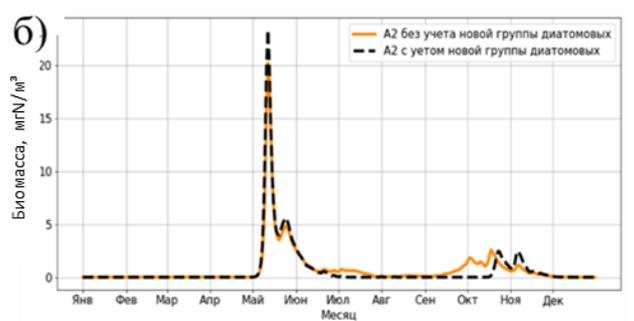
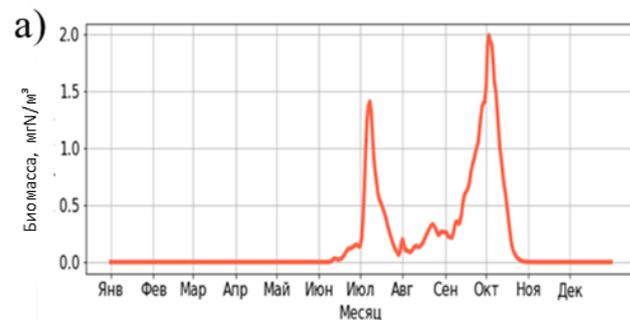


Рисунок Б9 — Результаты моделирования для Заонежского залива Онежского озера: а) биомассы летнего комплекса диатомовых водорослей; б) биомассы весеннего комплекса диатомовых водорослей; в) первичной продукции комплекса недиатомовых; г) температуры поверхностного слоя ВОДЫ

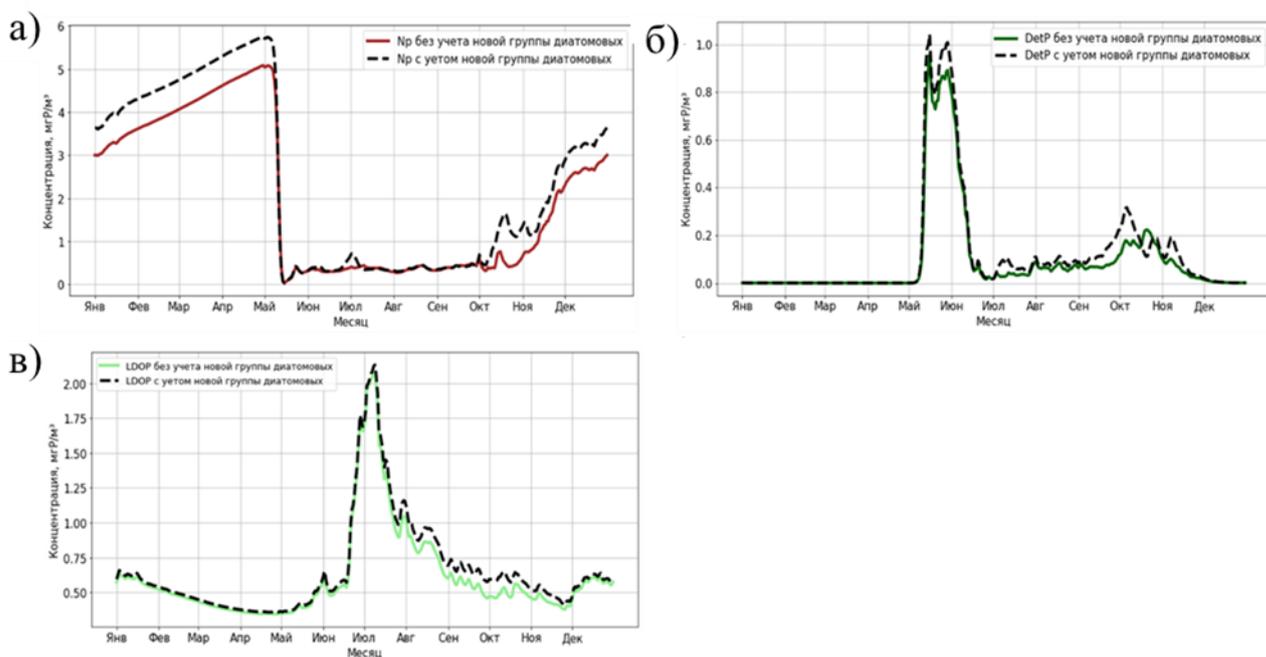


Рисунок Б10 — Результаты моделирования для Заонежского залива Онежского озера: а) сезонная динамика концентрации фосфатов; б) сезонная динамика концентрации фосфора в детрите; в) сезонная динамика концентрации лабильного растворенного фосфора

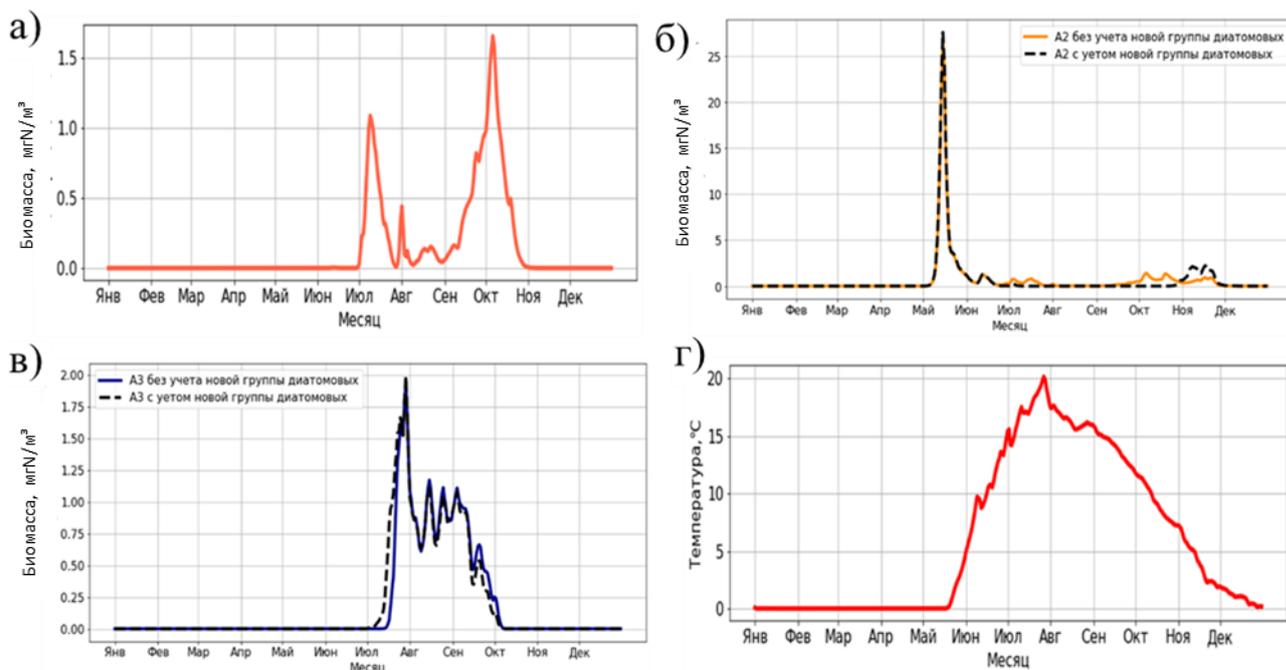


Рисунок Б11 — Результаты моделирования для Повенецкого залива Онежского озера: а) биомассы летнего комплекса диатомовых водорослей; б) биомассы весеннего комплекса диатомовых водорослей; в) первичной продукции комплекса недиатомовых; г) температуры поверхностного слоя ВОДЫ

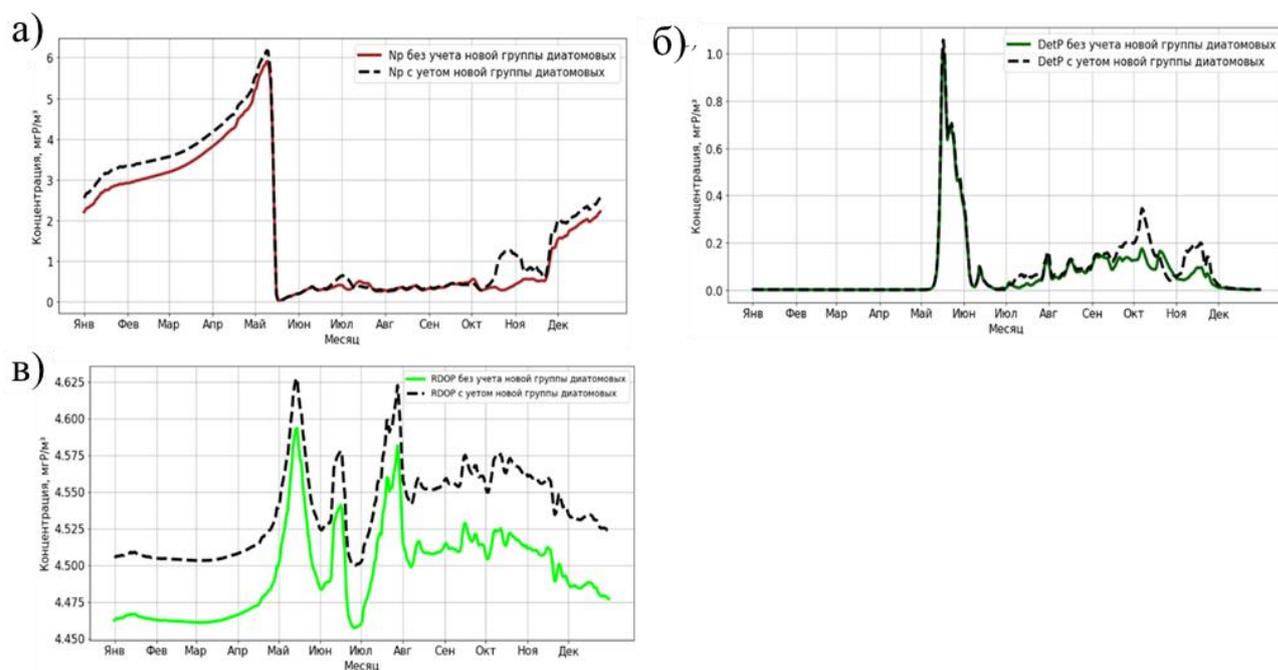


Рисунок Б12 — Результаты моделирования для Повенецкого залива Онежского озера: а) сезонная динамика концентрации фосфатов; б) сезонная динамика концентрации фосфора в детрите; в) сезонная динамика концентрации лабильного растворенного фосфора