УДК 551.464.4 – 551.464.7

Биогидрохимический портрет Белого моря

А. В. Леонов^{1,а}, Е. В. Колтовская², О. В. Чичерина¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1

E-mail: ^а leonov@ocean.ru

Получено 21.07.2017, после доработки — 20.11.2017.

Принято к публикации 25.01.2018.

Биогидрохимический портрет Белого моря построен с помощью расчетов на CNPSi-модели по систематизированным среднесезонным наблюдениям (среднемесячные гидрометеорологические, гидрохимические и гидробиологические параметры морской среды). Также в расчетах использована уточненная информация о выносе в морские акватории биогенных веществ со стоком основных рек-притоков (Нива, Онега, Северная Двина, Мезень, Кемь, Кереть). Параметры морской среды — значения температуры, освещенности, прозрачности, биогенной нагрузки. Для девяти районов моря (заливы Канда拉克шский, Онежский, Двинский, Мезенский, Соловецкие о-ва, Бассейн, Горло, Воронка, губа Чупа) характеристики портрета моря включают: изменение в течение года концентраций органических и минеральных соединений биогенных элементов (C, N, P, Si), биомассы организмов низших трофических звеньев (гетеротрофные бактерии, диатомовый фитопланктон, растительный и хищный зоопланктон) и другие показатели (скорости изменения концентраций веществ и биомасс организмов, внутренние и внешние потоки веществ, балансы отдельных веществ и биогенных элементов в целом). Расчетные по среднесезонным данным показатели состояния морской среды (температура воды, соотношения минеральных фракций N < P) и доминирующего диатомового фитопланктона в море (обилие, продукция, биомасса, содержание хлорофилла *a*) сравнивали с результатами отдельных съемок (за 1972–1991 и 2007–2012 гг.) по районам моря. При очевидных отличиях способов оценки значений показателей (по наблюдениям — аналитические методы, а при расчетах на модели — вычисления по соответствующим уравнениям) отмечена близость расчетных показателей состояния фитопланктона приведенным в литературе данным по фитопланктону Белого моря. Так, литературные оценки годовой продукции диатомовых водорослей в Белом море находятся в пределах 1.5–3 млн т С (при продолжительности вегетации 180 сут), а по расчетам она составляет ~2 и 3.5 млн т С при принимаемых периодах вегетации в 150 и 180 сут соответственно.

Ключевые слова: экосистема Белого моря, биогенные вещества (БВ), гетеротрофный бактериопланктон, диатомовый фитопланктон, растительный и хищный зоопланктон, детрит, трофическая цепь, CNPSi-модель биотрансформации БВ, экологический портрет Белого моря, сравнение наблюдаемых и расчетных показателей диатомовых водорослей (обилие, продукция, биомасса, хлорофилл *a*)

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-05-00356).

UDC 551.464.4 – 551.464.7

Biohydrochemical portrait of the White Sea

A. V. Leonov^{1,a}, E. V. Koltovskaya², O. V. Chicherina¹

¹ P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
Nahimovskiy prosp. 36, Moscow, 117997, Russia

² Lomonosov Moscow State University,
Leninskiye Gory 1, Moscow, 119991, Russia

E-mail: ^a leonov@ocean.ru

Received 21.07.2017, after completion — 20.11.2017.

Accepted for publication 25.01.2018.

The biohydrochemical portrait of the White Sea is constructed on the CNPSi-model calculations based on long-term mean annual observations (average monthly hydrometeorological, hydrochemical and hydrobiological parameters of the marine environment) as well as on updated information on the nutrient input to the sea with the runoff of the main river tributaries (Niva, Onega, Northern Dvina, Mezen, Kem, Keret). Parameters of the marine environment are temperature, light, transparency, and biogenic load. Ecological characteristics of the sea “portrait” were calculated for nine marine areas (Kandalaksha, Onega, Dvinsky, Mezensky Bays, Solovetsky Islands, Basin, Gorlot, Voronka, Chupa Bay), these are: the concentration changes of organic and mineral compounds of biogenic elements (C, N, P, Si), the biomass of organisms of the lower trophic level (heterotrophic bacteria, diatomic phytoplankton, herbivorous and predatory zooplankton) and other ones (rates of substance concentration and organism biomass changes, internal and external substance flows, balances of individual substances and nutrients as a whole). Parameters of the marine environment state (water temperature, ratio of mineral fractions $N < P$) and dominant diatom phytoplankton in the sea (abundance, production, biomass, chlorophyll content a) were calculated and compared with the results of individual surveys (for 1972–1991 and 2007–2012) of the White Sea water areas. The methods for estimating the values of these parameters from observations and calculations differ, however, the calculated values of the phytoplankton state are comparable with the measurements and are similar to the data given in the literature. Therefore, according to the literature data, the annual production of diatoms in the White Sea is estimated at 1.5–3 million tons C (at a vegetation period of 180 days), and according to calculations it is ~2 and 3.5 million tons C for vegetation period of 150 and 180 days respectively.

Keywords: White Sea ecosystem, nutrients, heterotrophic bacterioplankton, diatom phytoplankton, herbivorous and predatory zooplankton, detritus, trophic chain, CNPSi-model of nutrient biotransformation, ecological portrait of the White Sea, the comparison of the observed and calculated parameters of diatoms (abundance, products, biomass, chlorophyll a)

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 125–160 (Russian).

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 17-05-00356.

Введение

В России 2017 г. объявлен Годом экологии в связи с мировой тенденцией общественного внимания на экологические проблемы, которые есть в каждой стране и во всем мире в целом. По мнению экспертов, современная обстановка в области экологии с каждым годом ухудшается, и это касается всех компонентов окружающей среды (состояние почв, качество природных водных ресурсов, опреснение морских вод, снижение количеств зеленых насаждений). Также возрастает средняя температура, и потепление может привести к таянию ледников. Поэтому намечены мероприятия, цель которых — снизить возникшую напряженность по ухудшению экологического состояния окружающей среды, скорректировать тревожные прогнозы экологов и в целом улучшить экологическую обстановку. Это должно отразиться не только на общем состоянии окружающей среды, но и на отношении населения к экологическим проблемам [Информационный..., 2017]. Экосистемы арктических морей подвержены повышенному антропогенному воздействию, которое будет только усиливаться в связи с перспективами освоения/разработки нефтегазовых месторождений. Необходимо уделять должное внимание экологическому состоянию этих морей, а также изучению проблем качества морских вод (условий трансформации, регенерации, оборачиваемости соединений биогенных элементов, формирования продукции). В последние годы математическое моделирование стало одним из перспективных направлений изучения состояния водоемов и качества природных водных ресурсов, детального анализа особенностей биогидрохимических процессов, развивающихся и в пресноводных, и в морских водоемах.

В истории развития этого направления математического моделирования выделено несколько крупных этапов, связанных с разработкой и совершенствованием математических моделей.

(1) 1920–1930-е гг.: разработка моделей Стритера–Фелпса и Вольтерра–Лотки, а в последующие годы — их многочисленных модификаций. Эти модели описывают соответственно режим кислорода и трофические межпопуляционные взаимоотношения (типа «хищник–жертва»).

(2) 1940–1960-е гг.: в гидрологических исследованиях наметились два самостоятельных направления — с применением методов математической физики и с применением методологии системного анализа. Первое направление применяли для моделирования речного стока, второе — для рассмотрения водосборов в виде единой динамической системы. Водосборы изучали по воздействующим факторам на входе (гидрометеоданные) и итоговым характеристикам на выходе (гидрографы стока).

(3) 1960–1970-е гг.: математическое моделирование биогидрохимических процессов получило развитие в качестве самостоятельного научного направления в естествознании [Леонов, 1999].

Развитие работ по математическому моделированию на этапе (3) обусловлено определенными достижениями в изучении химического и биологического состава природных пресных и морских водоемов на основе разработанных химических, биологических, физико-химических и физических методов исследования природных вод и донных отложений. Эти методы позволили количественно изучать природную водную среду как среду обитания сообществ организмов. Появилась возможность проведения регулярных исследований по актуальным программам, связанным с гидрохимическими особенностями: условий формирования сырьевой базы и биопродуктивности природных вод, закономерностей химико-биологических процессов трансформации биогенных веществ (БВ), режима кислорода, процессов распада органических веществ (ОВ). Обращалось внимание на важность процессов регенерации биогенных субстратов в связи с изучением условий оборачиваемости и круговорота БВ в биосфере. Было показано, что исследований отдельных форм вещества и материи недостаточно для понимания особенностей формирования и реформирования состава компонентов водной среды. Для этого нужен комплексный или системный подход [Леонов, 1999].

Современные водно-экологические исследования природных вод, их состава и изменения во времени и пространстве основаны именно на системном подходе. Это обусловлено совокупным развитием химических, биологических и физических процессов, а также развитием антропогенного воздействия на среду обитания. Основное внимание в биогидрохимии уделяют изучению соединений элементов, входящих в состав живого вещества (С, N, P, Si) и называемых органогенными, биофильными или биогенными. Изучение трансформации соединений этих элементов, их циклов и круговорота (совместно или отдельно) в природных водах актуально вследствие не только недостаточной изученности, но и потому, что различные соединения этих элементов входят в состав большей части компонентов антропогенного загрязнения гидро- и биосферы. Кроме того, их содержание в природных водах в значительной степени влияет на потенциал биопродуктивности водоемов и на качество природных вод.

Следует отметить существенный вклад Т. А. Айзатуллина в развитие методологии моделирования биогидрохимических процессов и совместной химико-биологической трансформации БВ. Его фундаментальные работы [Айзатуллин, 1967, 1974] охватывают весь спектр проблемных вопросов биогидрохимии, включающих формализацию химико-биологических, биохимических и трофодинамических взаимодействий. Именно формализация указанных взаимодействий позволяет изучать особенности трансформации, перераспределения и соотношения БВ в морской среде.

Описание поведения морских экосистем воспроизводится системой нелинейных дифференциальных уравнений. В зависимости от целей моделирования число таких уравнений может меняться. Для качественного описания сообщества (как правило, фито- и зоопланктона) и важнейших биогенных элементов достаточно нескольких уравнений. Для описания изменения концентраций органических и неорганических соединений биогенных элементов (С, N, P, Si, S, O) и биомасс важнейших организмов-трансформаторов вещества (гетеротрофные бактерии, несколько групп фито- и зоопланктона) необходимо уже несколько десятков уравнений.

В настоящее время основные задачи биогидрохимических исследований, решаемые с помощью математического моделирования, связаны с изучением динамики концентраций веществ химико-биологической их трансформации в водной среде и в осадках, скоростей химико-биологических процессов, круговорота БВ в природных водах, условий формирования биопродуктивности водоемов, балансов соединений органогенных элементов, изучением обменных процессов на границах раздела «речной сток – море», «вода–атмосфера» и «вода–дно». В водной среде осуществляются физические, химические и биологические процессы, связанные с преобразованием и химико-биологической трансформацией БВ естественного и антропогенного происхождения. При изучении состава компонентов водной среды следует рассматривать указанные процессы не изолированно, а в тесной взаимосвязи. Поэтому современная методология изучения состава компонентов природных вод опирается на принципы системного анализа, объединяющего результаты исследований по основным естественным дисциплинам (химии, физике, биологии, географии, геологии), а также по смежным наукам (биогидрохимии, геохимии, биофизике, микро- и гидробиологии).

Степень сложности модельных разработок отражается на полученных представлениях о предмете, изученности отдельных вопросов формирования состава компонентов природных вод, обеспеченности информацией по отдельным дисциплинам, изучающим состояние водных ресурсов. Методология разработки моделей основана на комбинации детерминистического описания химических, биологических и физических процессов, развивающихся в водной среде. Исследуемые водоемы подразделяют на районы, каждый из которых изучают отдельно. В результате получают количественную информацию об изменениях во времени химических и биологических характеристик в зависимости от воздействия на экосистему водоема факторов среды обитания: температуры (T_w), освещенности, прозрачности воды, водного режима, биогенной нагрузки [Леонов, 1999].

Особенности исследования Белого моря

На Белом море в последние годы активно проводят различные исследования, результаты которых оперативно обобщают и публикуют [Система Белого моря, 2010, 2012, 2013]. Поскольку этот водоем служит своеобразным аналогом арктических морей, то на нем часто отрабатывают и совершенствуют методики исследований, а также современные приемы изучения морских акваторий в суровых климатических условиях Арктики. Одно из направлений современных исследований арктических морей связано с необходимостью изучения естественных экологических условий состояния и функционирования морских экосистем, а также потенциального нарушения их состояния при разработке месторождений углеводородного сырья и загрязнении морских акваторий нефтяными углеводородами (НУ) [Леонов, Чичерина, 2013; Леонов и др., 2017]. Зарубежный опыт свидетельствует о том, что разработка морских месторождений углеводородного сырья интенсифицирует сопутствующую деятельность на морских акваториях, увеличивает активность использования и антропогенного воздействия на них (возрастают морские перевозки, рост добычи НУ увеличивает вероятность аварийных ситуаций). Это неизбежно связано с итоговым (часто критическим) загрязнением морской среды и попаданием в нее разных количеств НУ [Немировская, 2004].

Состояние и функционирование экосистемы Белого моря (а также в значительной степени и других морей арктического бассейна) определяется воздействием следующих факторов: *климатических* (термический и ветровой режим, туманы и опасные гидрометеоявления — метели, обильные жидкие и твердые осадки), *океанологических* (течения, ветровое воздействие, приливы, фронтальные зоны, речной сток, лед), *гидрохимических* (соленость воды, содержание растворенного O_2 , $ОВ$ и $БВ$, pH воды), *геологических* (цветность и прозрачность воды, устойчивость берегов), *социально-экономических* (транспорт, водные ресурсы, население) и *экологических* (особо охраняемые территории, биопродуктивность, морские биоресурсы, загрязнение атмосферы и воды, нефтяное загрязнение) [Завернина, Коробов, 2007]. Перечисление указанных факторов — только качественное, оно вовсе не означает, что получены количественные оценки их влияния на состояние и качество морских вод в отдельных районах моря. Именно с помощью имитационных моделей можно получить необходимый практический опыт дальнейших исследований и более полного понимания решающей роли воздействия отдельных факторов на химико-биологические процессы, самоочищение морской среды, перераспределение $БВ$, $ОВ$ и компонентов ее загрязнения в разных акваториях моря. До настоящего времени по районам Белого моря в литературе не приведены наблюдения, на основе которых можно было бы оценить непрерывные внутригодовые изменения концентраций $БВ$, есть лишь фрагментарные оценки их концентраций по разным районам и в разные годы проведения наблюдений. Детальный анализ изменений концентраций разных фракций $БВ$ в водах Белого моря был проведен ранее по результатам предварительных расчетов на CNPSi-модели [Леонов и др., 2004, 2006].

Для любой морской экосистемы характерны сложившиеся за многие годы скорости физических, химических и биологических процессов, определяющие внутригодовые изменения показателей ее состояния. Они определяют динамику концентраций органических и минеральных фракций биогенных элементов (C, N, P, Si) и участвующих в их биотрансформации биомасс сообщества организмов низших трофических звеньев (гетеротрофные бактерии, фито- и зоопланктон). Характерные сезонные изменения основных биогидрохимических показателей морской экосистемы — своеобразный ее портрет. Они отражают воздействие на экосистему основных факторов среды обитания, путей поступления $БВ$ из внешних источников и реакцию морской экосистемы на внешние воздействия. Биогидрохимический портрет Белого моря можно охарактеризовать следующими количественными данными:

- 1) внутригодовой динамикой концентраций $БВ$, органических веществ ($ОВ$), а также биомасс организмов низшего трофического звена ($B1$ — гетеротрофные бактерии, $F1$ — доминирующий диатомовый фитопланктон, зоопланктон: $Z1$ — растительнояд-

- ный и Z2 — хищный), участвующих в трансформации БВ и ОВ и в их круговороте в разных районах моря;
- 2) оценкой роли организмов низшего трофического звена в биотрансформации и круговороте БВ и ОВ в водах Белого моря;
 - 3) значениями биопродукции (БП_i) организмов низшего трофического звена в разных районах Белого моря.

Очевидно, что назрела необходимость выполнения расчетов с помощью математического моделирования с использованием уточненных данных по комплексным исследованиям Белого моря. С их помощью можно получить реальную картину распределения концентраций БВ (прежде всего форм N и P, которые наиболее существенны для организмов, но в морской среде находятся в малых концентрациях и могут быть основными лимитантами развития фитопланктона [Сапожников, 2004]) и биомасс организмов, участвующих в их биотрансформации. Интерес есть и в информации об изменении скоростей процессов при различных условиях поставки и круговорота БВ в отдельных районах моря. По данным таких расчетов можно установить и оценить отличия в значениях продуктивности разных районов Белого моря. Их значения и причины изменчивости всегда служат предметом дискуссий и обсуждений в зависимости от условий среды и антропогенных воздействий на природную окружающую среду.

Краткая характеристика CNPSi-модели

По своей структуре CNPSi-модель наиболее полно соответствует требованиям, предъявляемым к прикладным моделям для изучения условий формирования качества вод и состояния морских экосистем. Особенность модели — в математическом описании в явном виде роли организмов: в биохимическом окислении естественных компонентов (БВ и ОВ) морской среды и загрязняющих веществ, а также в круговороте и регенерации минеральных соединений биогенных элементов (C, N, P, Si). Модель включает несколько групп организмов (гетеротрофные бактерии, B1, нефтеокисляющие бактерии, B2, диатомовый фитопланктон, F1¹; растительный и хищный зоопланктон, Z1 и Z2). Указанные группы организмов участвуют в биогидрохимической трансформации растворенных неорганических фракций P (DIP), Si (DISi) и N (аммонийный NH₄, нитритный NO₂, нитратный NO₃, мочевины UR), N_{min} (NH₄ + NO₂ + NO₃), органических фракций C (DOC), P (DOP), N (DON), Si (DOSi), взвешенных компонентов детрита — P (PD), N (ND), Si (SiD). Компонентами модели являются также растворенный кислород (O₂) и загрязняющие водную среду НУ. Структура модели позволяет описать полный комплекс взаимодействующих физических, химических и биологических процессов, связанных с трансформацией БВ, ОВ, НУ, минеральных фракций N, P, Si и биохимическим потреблением O₂.

Возможности практического применения любой модели (в частности, изучения с ее помощью актуальных водно-экологических проблем качества природных водных ресурсов) во многом определяются формализацией процессов совместной трансформации соединений биогенных элементов. Опыт разработки и применения большинства экологических моделей показывает, что комплексные экологические проблемы качества природных вод практически невозможно исследовать на основе моделей, строящихся на традиционно используемых упрощенных принципах описания процессов трансформации БВ кинетическими уравнениями 1-го порядка или уравнениями в форме Михаэлиса–Ментен–Моно. Такие модели не могут описать переходные состояния водных экосистем (от олиго- к мезо- и далее к более высокому трофическому их статусу). Такие преобразования претерпевают водоемы при антропогенных воздействиях (например, при сбросах загрязненных сточных вод) или в локальных районах, находящихся под периодическим влиянием речных стоков. Трансформация БВ — пример реагирования экосистем на изменения условий среды, а переходные состояния количественно характеризуют эту реакцию изменением концентраций БВ и биомасс организмов.

¹ В CNPSi-модель включены еще две группы фитопланктона (F2, F3), здесь они не упомянуты, так как их роль в трансформации БВ в Белом море второстепенна [Ильяш и др., 2003].

Совместную трансформацию соединений биогенных элементов сообществом организмов в CNPSi-модели воспроизводят с помощью модифицированного классического уравнения Михаэлиса–Ментен–Моно с учетом усовершенствований в описании биохимических процессов в экологических моделях [Леонов, 1986; Леонов, Сапожников, 1997].

- Трансформация БВ и ОВ в морской среде формализуется на основе имеющихся представлений о процессах их рецикла/круговорота. Организмы образуют свою биомассу при одновременном потреблении отдельных веществ, а своими выделениями продуктов обмена веществ и формированием детрита влияют на состав компонентов морской среды.
- Удельные скорости потребления отдельных БВ и ОВ биологическим объектом определяются содержанием субстратов в водной среде, приходящихся на единицу его биомассы. Эти скорости регулируют внутренние потоки вещества в процессе образования биомассы (определяют его активность по метаболическим выделениям продуктов обмена веществ и образованию детрита).
- Скорости метаболических выделений организмов в единицах (C, N, P, Si) составляют определенную долю от суммарных скоростей их потребления. Доли выделения метаболитов определяются значениями коэффициентов выделительной активности, они зависят от содержания веществ и биомасс организмов в водной среде. Биомассы организмов возрастают с увеличением потребления ими субстратов и уменьшаются до некоторой малой величины при снижении потребления субстратов (в условиях голодания). В этом смысл важнейшего регуляторного механизма изменения активности организмов, поддерживающего структурно-функциональную целостность экосистемы.
- Удельные скорости отмирания организмов регулируются значениями их биомасс и удельными скоростями потребления БВ. При избыточном питании (при высоких скоростях потребления БВ и низких биомассах) выживаемость организмов высокая, смертность низкая и есть рост биомассы. Напротив, при лимитированном питании (низкая удельная скорость потребления БВ) скорость отмирания организмов повышается и их биомасса снижается.
- Значения биомасс организмов регулируются также трофическими взаимодействиями (процессами их выедания организмами более высокого трофического звена) в сообществе. Оно также учитывается в модели при формализации процессов потребления разных субстратов для конкретных групп организмов.
- Морская среда — это система, включающая смесь субстратов. Потребляемые организмами субстраты подразделяются на взаимозаменяемые (соединения одного биогенного элемента) и невзаимозаменяемые (соединения разных элементов). Содержание форм разных элементов влияет на итоговую кинетику процессов утилизации имеющихся в водной среде субстратов сообществом организмов.
- Содержание БВ в морской среде поддерживается за счет его поступления из внешних источников (речной сток, атмосферные осадки, антропогенное загрязнение), а также при естественном рецикле БВ (многократного их круговорота) в морской среде в результате жизнедеятельности организмов.
- Кинетика потребления различных БВ организмами реализована при помощи уравнения с коэффициентами предпочтения для потребления отдельных БВ. Это позволяет при изменении их концентраций отразить переход развития организмов от его лимитирования содержанием одним биогенным элементом (или его отдельными соединениями) к лимитированию содержанием другим элементом.
- Процесс формирования биомассы организмов — переходный процесс от одного ее состояния к другому, он вызван изменениями факторов среды (водный режим, T_w , освещенность, прозрачность водной среды, биогенная нагрузка) и реакцией организмов на эти изменения. Смена состояния водных экосистем типична в естественных условиях, в частности при переходе от весеннего активного развития планктона к летнему заторможенному его функционированию из-за дефицита БВ.

- На каждом выделенном участке морской системы роль факторов среды может отличаться, поэтому оценивают мгновенные переходные состояния — скорости изменения и значения концентраций БВ, ОВ и биомасс организмов в зависимости от внешних воздействий, определяемых значениями естественных факторов среды и антропогенным воздействием.
- Используются показательные зависимости для описания нелинейного влияния T_w на скорости биотрансформации БВ и ОВ, для коррекции констант трансформации детрита, скоростей трансформации неорганических соединений и процесса обмена O_2 между водной средой и атмосферой.

Таким образом, в CNPSi-модели формализовано несколько важнейших регуляторных механизмов, обеспечивающих структурную и функциональную устойчивость экосистемы. Для модели, предназначенной для изучения открытой водной системы, реализован принципиальный подход по совместному моделированию динамики компонентов биологической системы с параметрами ее окружающей среды на основе синтеза гидробиологических, гидрохимических и гидрофизических знаний. Адекватная формализация биогидрохимических процессов позволяет рассматривать циклы соединений важнейших биогенных элементов в их взаимосвязи на системном уровне. Такое описание дает реальную возможность изучать механизмы сопряжения различных циклов при анализе закономерностей динамики биомасс гидробионтов и концентраций БВ в водной среде. Предложенный химико-кинетический аппарат позволяет изучать сложные биохимические, химические и физико-химические процессы и осуществлять математическое моделирование биотрансформации вещества в воде. Состояние экосистемы прослеживается в течение года по достаточно полному набору расчетных характеристик (концентрации БВ, биомассы разных групп организмов, скорости отдельных процессов, внутренние и внешние потоки веществ, их баланс, биогенная нагрузка).

Данная модель фактически воспроизводит переходные процессы и описывает реакцию водной экосистемы на изменения условий среды обитания или на изменение хотя бы одного из учитываемых в модели факторов среды (T_w , водный режим, освещенность, прозрачность, биогенная нагрузка). Отдельные блоки этой модели разрабатывали и калибровали по данным экспериментов с морской водой в микрокосмах [Айзатуллин, Леонов, 1975, 1977]. Практическое применение CNPSi-модель получила в исследованиях морских экосистем [Леонов и др., 2004, 2006, 2016, 2017; Леонов, Чичерина, 2013], для которых коэффициенты переноса через границы районов оценивали с помощью расчетов на гидродинамических моделях.

CNPSi-модель записана в форме обыкновенных дифференциальных уравнений. В них отражены учитываемые взаимодействия между концентрациями химических веществ и биомасс организмов водной среды, а также физическими параметрами ее состояния. Модель рассчитывает мгновенные скорости процессов, влияющих на изменение концентраций веществ, и итоговые концентрации компонентов в каждый момент времени в течение года с учетом заданных во входных данных изменений во времени основных факторов среды (водный режим, T_w , освещенность, прозрачность воды, фотопериод, биогенная нагрузка). Полное описание структуры CNPSi-модели, ее уравнений и используемых функций представлено в работе [Леонов, 2012], а краткое описание основных уравнений модели в этой работе показано в приложении.

Реализующий CNPSi-модель программный комплекс состоит из двух частей. Первая часть — непосредственно модель, включает уравнения и алгоритмы для описания функционирования водной экосистемы. Входными данными модели служат меняющиеся в течение года значения основных параметров состояния водной среды. Выходные данные модели — значения расчетных концентраций химических и биологических переменных, времена их оборота, удельная продукция организмов, внутренние и внешние потоки веществ, по которым оцениваются суммарные значения балансов соединений биогенных элементов. Вторая часть комплекса позволяет отображать на экране монитора или на принтере полученную по результатам расчетов на модели информацию об изучаемом водоеме в виде графиков, таблиц, диаграмм.

Уравнения модели записаны на языке RM-FORTRAN и включают две основные программы — BALPHOS (для ввода данных) и BAL (для вычисления параметров), — а также набор подпрограмм и функций (для выполнения всех промежуточных операций и вычисления вспомогательных характеристик). Отметим, что CNPSi-модель — это усовершенствованная версия разработанной в Международном институте прикладного системного анализа (г. Лаксенбург, Австрия) имитационной модели фосфорной системы [Леонов, 1986]. В эту модель было введено описание процессов трансформации соединений C, N и Si, а также унифицированной программы расчета водообмена/переноса веществ в двуслойной экосистеме водоема. Изучаемый водоем может быть подразделен на несколько районов (от 1 до 10). В CNPSi-модели сохранены структура, аббревиатура, перечень и взаимосвязь всех включенных подпрограмм и функций, которые ранее были задействованы в имитационной модели фосфорной системы.

Особенности формализации биогидрохимических процессов в CNPSi-модели свидетельствуют об оригинальности данной разработки и о возможности ее использования в качестве инструмента водно-экологических исследований [Леонов и др., 2004, 2006, 2016, 2017; Леонов, Чичерина, 2013]. Модель позволяет получить информацию для сравнения разных характеристик морских экосистем (по гидрохимии, комплексу природных параметров, значениям биопроductивности, балансам БВ и элементов, источникам БВ и т. д.). Таким образом, CNPSi-модель можно использовать в качестве инструмента для работ в рамках относительно нового направления современного мореведения [Максимова, 2004] для сопоставления условий в морских экосистемах и при систематизации данных по гидрохимии морских объектов [Сапожников, 2004].

Входные данные для расчетов на CNPSi-модели

Белое море было подразделено на девять отдельных районов (рис. 1). Для расчетов были собраны данные по разным районам Белого моря из разных литературных источников и отчетов об экспедиционных исследованиях этого водоема. Они включают количественные характеристики по морфометрии районов, ежемесячным показателям состояния водной среды

Рис. 1. Подразделение Белого моря на районы 1–9: 1 — Кандалакшский зал., 2 — Онежский зал., 3 — Двинский зал., 4 — Мезенский зал., 5 — Соловецкие о-ва, 6 — глубоководная часть, Бассейн, 7 — Горло, 8 — Воронка, 9 — губа Чупа

(T_w , прозрачность воды, освещенность водной поверхности, фотопериод) [Белое море..., 1991; Океанографические..., 1991]. Показатели водного режима (атмосферные осадки, расходы на границах выделенных акваторий, водный сток рек) были оценены с помощью гидродинамической модели. В данном случае использована однослойная версия водообмена через границы внутри Белого моря (между выделенными районами 1–9) и на внешней границе между Белым и Баренцевым морями (расчеты на гидродинамической модели выполняли в ИВПС Карельского НЦ РАН, г. Петрозаводск). В этом случае не принимали во внимание роль вертикальной составляющей в возможном водообмене между верхним и нижним слоями воды.

Набор собранных данных использовали в проведенных ранее модельных расчетах при исследовании внутригодовых концентраций БВ по районам Белого моря [Леонов и др., 2004, 2006, 2013]. Для получения данных о биогидрохимическом портрете Белого моря были уточнены концентрации БВ в водах основных рек-притоков Белого моря (учтены результаты работ Гидрометеослужбы [Коршенко и др., 2010; Соболевская и др., 2011, 2012, 2013а, 2013б] и данные материалов XVII–XX конференций «Геология морей и океанов» по измерениям концентраций растворенного органического С (DOC), форм N и P в реках Северная Двина [Гордеев и др., 2012; Кузнецов и др., 1991; Мискевич, 2008; Ружникова, Морева, 2013; Чульцова, 2009, 2011, 2012; Чульцова, Скибинский, 2007, 2008; Шевченко и др., 2012; Широкова и др., 2012; Artemyev, Romankevich, 1988], Онега [Ефимова и др., 2011; Ружникова, Морева, 2013], Кемь [Потапова, 2012; Шевченко и др., 2012], Мезень [Ружникова, Морева, 2013; Шевченко и др., 2012; Lobbes et al., 2000]).

При запуске модели в нее вводятся входные данные при считывании информации из отдельных файлов:

- TIMES (режим выполнения расчетов);
- CONSTANTS (значения коэффициентов модели);
- C_month (начальные значения параметров для верхнего и нижнего слоев и среднемесячные концентрации БВ в водах рек-притоков для каждого района);
- Depi_V (значения для каждого месяца в теплый период года среднего положения глубины термоклина, а в холодные месяцы — глубины зимней вертикальной циркуляции водных масс для подразделения столба воды на два слоя);
- WAT (значения расходов воды для расчетов водообмена через границы районов);
- PHYS1–10 (физические характеристики верхнего слоя: значения T_w , освещенности, фотопериода, продолжительности светового дня, средней глубины для каждого дня года в конкретном районе водоема);
- TEMP2 (значения среднемесячных T_w в нижнем слое);
- CONC1–10 (средние скорости возможного ежемесячного поступления БВ в каждый район водоема из рассредоточенных источников);
- WIND1–10 (направление и скорость ветра в каждом районе, способные нарушать развитие естественного водообмена между районами водоема).

Расчеты на CNPSi-модели [Леонов, 2012] выполняли для календарного года (с 1 января по 31 декабря) с шагом 0.05 сут методом Рунге–Кутты 4-го порядка. Применение в расчетах среднесезонных параметров состояния морской среды для получения биогидрохимического портрета Белого моря предполагает сбалансированность основных факторов среды, влияющих на внутригодовую динамику процессов трансформации и внутренние потоки БВ в морской среде. Это означает возврат к концу года системы в исходное состояние при завершении развивающихся внутри года в водной среде переходных процессов. Такое состояние характеризуется практическим равенством в начале и в конце года концентраций отдельных БВ и биомасс организмов (свидетельство так называемого условия «замыкания года»). Такие условия достигаются уже на второй расчетный год, поэтому расчеты на CNPSi-модели проводили для двух лет, а в данной работе приведены результаты для второго года (по начальным концентрациям БВ, соответствующим среднесезонным условиям среды и отражающим эффект «замыкания года»).

Анализ внутригодовой расчетной динамики концентраций БВ

Расчетная внутригодовая динамика растворенных органических и минеральных форм N и P, а также детрита (ND и PD) для девяти районов Белого моря показана на рис. 2–4. В течение года расчетные концентрации ряда БВ в отдельных районах изменяются по сходным сценариям, но могут быть и определенные региональные отличия.

Изменения внутри года концентраций БВ отражают закономерности их биогидрохимической трансформации и особенности пространственного распределения в изучаемых районах моря. Непрерывная динамика концентраций БВ, получаемая с помощью CNPSi-модели [Леонов, 2012], позволяет выявить особенности изменений в течение года условий среды и их воздействия на состояние морской экосистемы. Выявляемые особенности расчетной сезонной динамики концентраций форм N и P можно использовать для характеристики состояния морской среды или объяснения закономерностей изменений, связанных с отличиями в поступлении и трансформации БВ в разных районах моря. Концентрации БВ могут быть полезными индикаторами состояния водных масс при их идентификации (эта возможность исследований вод Белого моря еще не оценена).

Рис. 2. Изменение расчетных концентраций форм N ($N_{\min}$, DON и ND) в водах районов 1–9 Белого моря (см. рис. 1): (а), (в), (д) — районы заливов (1–4, 9); (б), (г), (е) — районы открытого моря (5–8)

Рис. 3. Изменение расчетных концентраций форм Р (DIP, DOP и PD) в водах районов 1–9 Белого моря (см. рис. 1): (а), (в), (д) — районы заливов (1–4, 9); (б), (г), (е) — районы открытого моря (5–8)

Особенности изменения расчетных концентраций форм N и P по районам моря

Концентрации форм N ($N_{\min}$, DON, ND) и P (DIP, DOP, PD)

- Концентрации органических форм N и P в целом выше в заливах, чем в открытых водах моря. Наибольшее среди заливов содержание DON и DOP было установлено для Двинского зал. (0.2447 мг N/л, 0.0336 мг P/л), а в открытых водах моря — для Бассейна (0.1489 мг N/л, 0.0250 мг P/л). Летом их концентрации высоки в водах Соловецких о-вов (0.0891 мг N/л, 0.0209 мг P/л).
- Содержание $N_{\min}$ и DIP в заливах и открытых водах моря летом наименьшее (< 0.24 мкг N/л и 1–3 мкг P/л), а соотношение $N/P < 1$ свидетельствует об условиях азотного лимитирования развития фитопланктона.
- Наиболее сложная динамика обнаруживается для концентраций форм детрита (ND и PD): внутри года в разные сроки зафиксированы по два-три их максимума. В сравнении с другими районами в Двинском зал. выше максимумы ND и PD весной

Рис. 4. Изменение расчетных концентраций агрегированных форм N (N_{par} , N_{dis} и N_{tot}) в водах районов 1–9 Белого моря (см. рис. 1): (а), (в), (д) — районы заливов (1–4, 9); (б), (г), (е) — районы открытых акваторий моря (5–8)

(0.1181 мг N/л, 0.0248 мг P/л) и осенью (0.1320–0.1469 мг N/л, 0.0443 мг P/л). Весенние максимумы ND сопоставимы в зал. Кандалакшский и губе Чупа (0.0963 и 0.0800 мг N/л). Также сопоставимы максимумы PD весной и осенью в Кандалакшском зал. (0.0202 и 0.0219 мг P/л) и в губе Чупа (0.0155 и 0.0174 мг P/л). В заливах Онежский и Мезенский весенние максимумы ND (0.0743 и 0.0745 мг N/л) выше осенних (0.0359–0.04645 и 0.0259–0.0375 мг P/л), а максимумы PD весной (0.0114 и 0.0115 мг P/л) и осенью (0.0102 и 0.0104 мг P/л) практически одинаковы.

- Максимумы PD в водах Соловецких о-вов, как и в заливах, есть весной (0.0121 мг P/л) и осенью (0.0194 мг P/л); в Бассейне летом имеется один небольшой максимум ND (0.0364 мг N/л), а их минимумы отмечены в конце мая и августа. В Горле и Воронке с весны до конца года содержание ND повышено (0.0631 и 0.0964 мг N/л). Весной в открытых водах максимум PD зафиксирован в разные сроки, его значения в заливах Кандалакшский и Двинский (0.0202 и 0.0248 мг P/л) выше (в 1.6–2 раза), чем в других районах. Летний минимум PD зафиксирован на ~200-е сут, а промежуточные максимумы PD летом есть в Двинском зал. (0.0248 мг P/л) и в водах Соловецких о-вов (0.0121 мг P/л). В Бассейне и Горле максимумы PD отмечены весной (0.0127 и 0.0125 мг P/л)

и осенью (0.0173 и 0.0110 мг Р/л). В Воронке во вторую часть года отмечены колебания концентраций PD с максимумами в конце лета, середине и конце осени (0.0149, 0.0140 и 0.0155 мг Р/л). Более высокие максимумы PD зафиксированы весной в заливах, в открытых водах моря они отмечены на месяц позднее. Осенью максимумы PD по районам формируются почти одновременно, но их значения отличаются.

Концентрации агрегированных форм N и P включают: содержание N во взвешенном веществе (в детрите, ND; в биомассах организмов, $N_{liv} = B1N + F1N + F2N + F3N + Z1N + Z2N$, и суммарно $N_{par} = ND + N_{liv}$), в минеральных формах ($N_{min} = NH_4 + NO_2 + NO_3$), в растворенных формах ($N_{dis} = N_{min} + DON$) и суммарно ($N_{tot} = N_{par} + N_{dis}$), а также содержание форм P ($P_{par} = PD + P_{liv}$ – суммы P в детрите, PD, и биомассах организмов, $P_{liv} = B1P + F1P + F2P + F3P + Z1P + Z2P$; $P_{dis} = DIP + DOP$; $P_{tot} = P_{par} + P_{dis}$). Формы N и P позволяют оценить условия сбалансированности развития внутриводоемных процессов и трансформации соединений биогенных элементов (N и P), особенности круговорота отдельных БВ в морской среде. Также рассматриваются их поступления из внешних источников, при переносе веществ водными массами через границы районов Белого моря и при водообмене с Баренцевым морем. Расчетная годовая динамика агрегированных форм N и P показана соответственно на рис. 4 и 5.

Рис. 5. Изменение расчетных концентраций агрегированных форм P (P_{par} , P_{dis} и P_{tot}) в водах районов 1–9 Белого моря (см. рис. 1): (а), (в), (д) — районы заливов (1–4, 9); (б), (г), (е) — районы открытых акваторий моря (5–8)

Особенности изменения расчетных концентраций агрегированных форм N и P

Изменение концентраций агрегированных форм N (N_{par} , N_{dis} , N_{tot}) и P (P_{par} , P_{dis} , P_{tot}) показывает сбалансированность процессов биотрансформации БВ. Это определяется круговоротом отдельных БВ в морской среде, их поступлениями из внешних источников, переносом БВ водными массами через границы районов Белого моря и водоомена с Баренцевым морем.

Минимальные концентрации или их нижние пределы (НП) для N_{par} и P_{par} наименьшие в заливах Онежский (0.0009 мг N/л и 0.0002 мг P/л) и Мезенский (0.0014 мг N/л и 0.0003 мг P/л), НП концентрации N_{par} повышен в Воронке (0.0166 мг N/л), а P_{par} — в Бассейне (0.0063 мг P/л). Наибольшие концентрации или верхние пределы (ВП) N_{par} и P_{par} высшие в Двинском зал. (0.2145 мг N/л и 0.0806 мг P/л), повышены они и в заливах Кандакшский (0.1361 мг N/л и 0.0588 мг P/л) и Онежский (0.1350 мг N/л и 0.0570 мг P/л). В водах Соловецких о-вов повышен НП у N_{par} (0.1324 мг N/л), а в Бассейне — у P_{par} (0.0266 мг P/л). Амплитуды колебаний концентраций N_{par} и P_{par} внутри года наименьшие — в Бассейне (0.0672 мг N/л и 0.0203 мг P/л), наибольшие — в Двинском зал. (0.2050 мг N/л и 0.078 мг P/л). Амплитуды изменений N_{par} повышены в Онежском зал. (0.1341 мг N/л) и губе Чупа (0.1327 мг N/л), а P_{par} — в зал. Кандакшский (0.0577 мг P/л), Онежский (0.0568 мг P/л) и в водах Соловецких о-вов (0.0578 мг P/л).

НП концентраций N_{dis} наименьший для вод Онежского зал., Бассейна и Соловецких о-ов (0.0060–0.0066 мг N/л), а P_{dis} — в губе Чупа, Бассейне и Горле (0.0001–0.0002 мг P/л). Повышены значения НП концентраций N_{dis} в водах губы Чупа (0.0390 мг N/л) и Двинского зал. (0.0290 мг N/л), а P_{dis} — в водах Онежского зал. и Соловецких о-вов (0.0067–0.0069 мг P/л). ВП концентраций N_{dis} и P_{dis} наибольшие — в Двинском зал. (0.2464 мг N/л и 0.0533 мг P/л), повышены они в водах Соловецких о-вов (0.1580 мг N/л и 0.0412 мг P/л), а концентраций P_{dis} — в Кандакшском зал. (0.0450 мг P/л). Амплитуда внутригодовых колебаний N_{dis} и P_{dis} наименьшая — в Воронке (0.0691 мг N/л и 0.0174 мг P/л) и наибольшая — в Двинском зал. (0.2174 мг N/л и 0.0482 мг P/л). Также высока амплитуда внутригодовых колебаний P_{dis} в Кандакшском зал. (0.0409 мг P/л).

Изменения внутри года концентраций N_{dis} и P_{dis} в разных районах однотипны: их значения повышены зимой, снижение имеет место весной, максимумы формируются летом, осенью они снижаются и повышаются к концу года. Отличия есть в амплитудах летом — по всем районам она выше у концентраций N_{dis} ; Мезенский зал., губа Чупа, Горло и Воронка характеризуются малой амплитудой концентраций P_{dis} .

НП концентраций N_{tot} наименьший — в водах Бассейна (0.0132 мг N/л), P_{tot} — в Горле (0.0166 мг P/л), повышен НП концентраций N_{tot} в губе Чупа (0.1205 мг N/л), P_{tot} — в Двинском зал. (0.0476 мг P/л). Наибольший ВП концентраций N_{tot} зафиксирован в Двинском зал. и в губе Чупа (0.3144 и 0.2804 мг N/л), а P_{tot} — в заливах Двинский (0.0884 мг P/л), Кандакшский (0.0651 мг P/л), Онежский (0.1709 мг P/л) и в водах Соловецких о-вов (0.0660 мг P/л). Понижены ВП концентраций N_{tot} в Онежском зал. (0.1709 мг N/л) и в районе Соловецких о-вов (0.1790 мг N/л), а P_{tot} — в Воронке и Горле (0.0306 и 0.0318 мг P/л). Мала амплитуда колебаний концентраций N_{tot} в районе Соловецких о-вов (0.1103 мг N/л), P_{tot} — в Воронке (0.0128 мг P/л). Высоки амплитуды концентраций N_{tot} и P_{tot} — в Двинском зал. (0.1969 мг N/л и 0.0408 мг P/л).

Особенность динамики концентраций N_{tot} и P_{tot} — отсутствие колебаний в первой половине года и формирование максимумов во вторую его половину. Более выражена для открытых вод тенденция образования максимальных концентраций N_{tot} во вторую половину года, чем для концентраций P_{tot} . Исключение представляет район Соловецких о-вов, а в других районах — максимумов концентраций P_{tot} не выявлено.

Анализ расчетной динамики показателей биомасс $B1N$, $F1N$, $Z1N$ и $Z2N$

Изменчивость концентраций БВ в районах 1–9 (рис. 2–5) существенно дополняют данные по динамике биомасс организмов (вычисляются в единицах N) (рис. 6), удельным скоростям их роста (k_{0i} , сут⁻¹) и биопroduкции ($БП_i$). Анализ расчетных изменений концентраций БВ (рис. 2–5) показал, что зимой трансформация БВ замедлена из-за неблагоприятных условий роста биомасс. Каждую группу организмов характеризуют значения их показателей (биомасса, k_{0i} и $БП_i$), которые в течение года изменяются в зависимости от условий среды и наличия БВ (субстратов питания). Повышенные значения указанных параметров в течение года характерны для периодов с благоприятными для развития биомасс условиями среды, и у каждой группы организмов активное развитие биомасс зафиксировано в разные временные периоды. Значение $БП_i$ вычисляют по расчетным потокам потребления организмами БВ, выделения продуктов обмена, отмирания биомасс и их выедания организмами более высоких трофических уровней, а также с учетом потерь биомасс при их выносе течениями через границы районов в соседние

Рис. 6. Изменение расчетных биомасс бактерий $B1N$ (а, б), фитопланктона $F1N$ (в, г) и зоопланктона $Z1N$ (д, е) в водах районов 1–9 Белого моря (см. рис. 1): (а), (в), (д) — районы заливов (1–4, 9); (б), (г), (е) — районы открытых акваторий моря (5–8)

акватории. Итоговые расчетные значения $B\bar{P}_i$ представлены для каждого месяца (в г элемента/(м³ · мес)) и за год (г элемента/(м³ · год)), они отражают зависимость этого показателя от количества вещества, приходящегося на единицу объема воды. Все внутренние потоки БВ вычисляются для каждого шага по времени, их суммируют в течение каждого месяца и в целом для всего расчетного года. На условия роста биомасс организмов существенно влияет динамика водных масс (имеются характерные их отличия в каждом районе), и ее воздействие на химико-биологические показатели состояния водной среды меняется в течение всего года.

Биомассы организмов — это важнейшие показатели биогидрохимического портрета Белого моря, и их можно охарактеризовать информацией о годовой динамике вычисленных в единицах N биомасс (гетеротрофных бактерий $B1N$, диатомового фитопланктона $F1N$, растительного и хищного зоопланктона, $Z1N$ и $Z2N$), об удельных скоростях их роста k_{0i} и биопroduкции $B\bar{P}_i$. Для районов 1–9 характерно формирование в течение года нескольких максимумов их биомасс. При этом отмечено смещение сроков их формирования у конкретных организмов из-за региональных/сезонных различий в условиях среды по районам моря. Весной такие отличия — следствие временных колебаний в прогреве водной толщи, а осенью — интенсивности круговорота БВ, особенностей биогидрохимии среды, развития организмов и поступления БВ при водообмене через границы районов. Анализ внутригодовой динамики и изменений показателей биомасс связан с биогидрохимией морской среды и служит неотъемлемой характеристикой портрета Белого моря.

Особенности динамики расчетных биомасс гетеротрофных бактерий $B1N$

В течение года формируется 1–2 максимума биомасс $B1N$, их значения и сроки отличаются по районам моря. В районах 1–9 весенний максимум $B1N$ образуется на 147–166-е сут, его значения по районам — в пределах 0.0046–0.0119 мг N/л (наименьшее — в Горле, наибольшее — в Двинском зал.). Максимумы формируются при наибольших k_{0B1} , их пределы — от 0.204–0.262 (Бассейн, Горло) до 0.457–0.532 сут⁻¹ (остальные районы). Весенние значения $B\bar{P}_{B1}$ (г N/(м³ × мес.)) отмечены в мае–июне: 0.1044–0.1605 (Двинский зал., губа Чупа), 0.0931–0.0818 (зал. Мезенский, Воронка) и 0.0492–0.0529 (Бассейн); и в июне: 0.0430–0.0577 (заливы Кандалакшский, Онежский, Соловецкие о-ва и Горло).

Второй максимум $B1N$ (0.0012–0.0082 мг N/л) отмечен на 231–279-е сут в водах заливов Кандалакшский, Двинский, Мезенский, Бассейн, Горле и Воронке при наибольших значениях k_{0B1} 0.017–0.056 сут⁻¹ (на 185–250-е сут). Им соответствуют повышенные $B\bar{P}_{B1}$ (г N/(м³ × мес.)): в июле–августе — в Горле (0.0593–0.0534), Воронке (0.0891–0.1011), губе Чупа (0.1379–0.1094); в августе — в Двинском зал. (0.0671), губе Чупа и Воронке (0.0514–0.0519), Мезенском зал. (0.0387), Бассейне (0.0217) и зал. Кандалакшский (0.0136).

По районам моря годовые значения $B\bar{P}_{B1}$ (г N/(м³ × год)) снижаются в следующем порядке: губа Чупа (0.5488), Двинский зал. (0.4707), Воронка (0.4347), Мезенский зал. (0.2897), Горло (0.2083), Бассейн (0.1935), Кандалакшский зал. (0.1272), Соловецкие о-ва (0.1269), Онежский зал. (0.1001).

Особенности динамики расчетных биомасс диатомового фитопланктона $F1N$

В развитии $F1N$ максимумы формируются весной, в начале лета и осенью. В районах заливов Кандалакшский, Онежский, Двинский, Мезенский, Соловецких о-вов, Воронке, губе Чупа весенний максимум приходится на 108–111-е сут (0.0109–0.0168 мг N/л), в Горле — на 120-е сут (0.0115) и в Бассейне — на 142-е сут (0.0102 мг N/л), наибольшие k_{0F1} (сут⁻¹): ~0.2 (Горло), 0.429–0.454 (Бассейн, Воронка), 0.775–0.851 (Кандалакшский зал., губа Чупа), 0.970–1.179 (Соловецкие о-ва, Двинский зал.), 1.489–2.247 (Онежский зал., Мезенский зал.).

Расчеты и наблюдения отражают в первой половине апреля активизацию вегетации диатомовых, а в мае — их наибольшую численность. В апреле–мае повышены значения $БП_{F1}$ ($г\ N/(м^3 \times мес.)$): в заливах Кандалакшский (0.0639–0.0587), Онежский (0.0664–0.0556), Двинский (0.0702–0.1372), Мезенский (0.1654–0.1115), в губе Чупа (0.1596–0.1292), в водах Соловецких о-вов (0.0674–0.0457), Бассейна (0.0313–0.0928), Горла (0.0446–0.0667), Воронки (0.0990–0.0866).

Летом значения $F1N$ минимальны (0.7–8.0 $мкг\ N/л$ при колебаниях k_{0F1} 0.005–0.488 $сут^{-1}$). Расчетная средняя скорость роста биомассы $F1N$ в губе Чупа для лета 0.056 $сут^{-1}$ совпадает с приведенной в литературе для лета удельной скоростью фотосинтетической активности $F1$ (0.05 $сут^{-1}$) [Ильяш и др., 2003].

Осенью максимум $F1N$ ($мкг\ N/л$) отмечен на 341-е сут в заливах Кандалакшский (4.3), Онежский (1.1), Двинский (5.6), Мезенский (5.5), водах Соловецких о-вов (1.9) (при k_{0F1} 0.111–0.358 $сут^{-1}$), и на 346–348-е сут — в Горле (5.4), Воронке (7.9), в губе Чупа (4.1) и Бассейне (5.5) (при k_{0F1} 0.132–0.279 $сут^{-1}$). Осенью повышены значения $БП_{F1}$ ($г\ N/(м^3 \times мес.)$): в заливах Кандалакшский (0.0280), Онежский (0.0100), Двинский (0.0479), Мезенский (0.0442), губе Чупа (0.0849), в водах Соловецких о-вов (0.0103), Бассейна (0.0476), Горла (0.0337) и Воронки (0.0744).

Районы образуют ряд по снижению годовых значений $БП_{F1}$ ($г\ N/(м^3 \times год)$): губа Чупа (1.1140), Двинский зал. (0.9777), Воронка (0.7490), Мезенский зал. (0.7119), Бассейн (0.5399), Кандалакшский зал. (0.4821), Горло (0.4608), Соловецкие о-ва (0.3395), Онежский зал. (0.2822).

Особенности динамики расчетных биомасс растительного зоопланктона $Z1N$

В районах 1–9 отмечено по два максимума биомасс $Z1N$: первый — летом (начало–середина июня), второй — в начале октября. Летний максимум $Z1N$ — на 156–173-и сут (0.0142–0.0429 $мг\ N/л$) (диапазон для Бассейна — Двинского зал.). Близкие наибольшие значения k_{0Z1} = 1.129–1.430 $сут^{-1}$ (ниже только в водах Бассейна — k_{0Z1} = 0.339 $сут^{-1}$). Повышенные значения $БП_{Z1}$ ($г\ N/(м^3 \times мес.)$) выявлены в июне–июле — в заливах Кандалакшский (0.2712), Онежский (0.3030–0.1168), Двинский (0.5050–0.1380), Мезенский (0.2365), губе Чупа (0.3247–0.1351), в водах Соловецких о-вов (0.2568–0.1371), Бассейна (0.1547–0.1421), Горла (0.3128–0.1689), Воронки (0.2521).

Второй максимум $Z1N$ отмечен на 243-и сут в Бассейне (0.0131 $мг\ N/л$), в других районах — на 281-е сут (0.0123–0.0287 $мг\ N/л$). В Бассейне он связан не с ростом биомассы (здесь в период с 238 по 365-е сут k_{0Z1} = 0), а с ее выносом из соседних районов; в других районах второй максимум биомассы $Z1N$ характеризуют k_{0Z1} = 0.383–0.462 $сут^{-1}$. Осенью биомассам $Z1N$ отвечают значения $БП_{Z1}$ ($г\ N/(м^3 \times мес.)$): в сентябре — для Бассейна (0.1802) и в сентябре–октябре — для заливов Кандалакшский (0.1818–0.2772), Онежский (0.1558–0.2299), Двинский (0.2948–0.4577), Мезенский (0.1408–0.1808), губы Чупа (0.1643–0.2687), вод Соловецких о-вов (0.1966–0.2861), Горла (0.1318–0.2102), Воронки (0.1014–0.1677).

Годовые значения $БП_{Z1}$ ($г\ N/(м^3 \times год)$) снижаются в последовательности: Двинский зал. (1.7579), губа Чупа (1.1221), Соловецкие о-ва (1.0519), Горло (1.0178), заливы Онежский (0.9467), Кандалакшский (0.8955), Мезенский (0.8198), Воронка (0.7821) и Бассейн (0.7610).

Особенности динамики расчетных биомасс растительного зоопланктона $Z2N$

В заливах моря образуются по два выраженных максимума биомасс $Z2N$, а в открытых водах — по одному максимуму. В заливах первый максимум $Z2N$ приходится на 173–197-е сут (0.0105–0.0149 $мг\ N/л$), второй максимум в заливах Мезенский и Кандалакшский (0.0136

и 0.0161 мг N/л) отмечен на 245–257-е сут, а в заливах Онежский, Двинский и губа Чупа образуются продолжительные максимумы повышенных биомасс (> 0.0120 мг N/л) соответственно на 240–267-е, 238–281-е и 233–264-е сут. В открытых водах продолжительные периоды повышенных биомасс Z2N отмечены на 192–276-е, 185–262-е, 200–281-е и 195–293-и сут соответственно в водах Соловецких о-вов (> 0.0113 мг N/л), Бассейна (> 0.0104), Горла (> 0.0081) и Воронки (> 0.0065 мг N/л).

Во всех районах моря в течение года времена оборота биомасс Z2N меняются в одинаковых диапазонах и составляет ~ 32 сут в первую половину года, 0.4–10 сут в период развития биомасс и в летний сезон, и в пределах 10–30 сут при переходе от осени к зиме.

Повышены значения БП_{Z2} (г N/(м³×мес.)) в Мезенском зал. (0.0736–0.0988) в июне–сентябре, в Бассейне (0.1369–0.1654) в июле–сентябре, в Онежском зал. (0.1360–0.1418) в августе–сентябре, в Кандалакшском зал. (0.1597) в сентябре, в Двинском зал. (0.1127–0.2638) в июне–октябре, в водах Соловецких о-вов (0.0713–0.1654), в Горле (0.0548–0.0932), Воронке (0.0508–0.0720) и в губе Чупа (0.0714–0.1238) в июле–октябре.

Годовые значения БП_{Z2N} (г N/(м³×год)) по районам располагаются в таком порядке: Двинский зал. (0.9600), Соловецкие о-ва (0.5180), Бассейн (0.5057), Онежский зал. (0.4303), губа Чупа (0.4209), Мезенский зал. (0.4200), Кандалакшский зал. (0.3823), Горло (0.2992) и Воронка (0.2765).

Сравнение значений показателей, измеренных в разных съемках на Белом море и вычисленных с помощью CNPSi-модели

Вычисленные на CNPSi-модели значения показателей морской среды и развития фитопланктона *F1* были сопоставлены с соответствующими натурными наблюдениями в разных районах Белого моря за 1972–1991 гг. [Ильяш и др., 2003]. В этих съемках оценивались значения T_w , °C и содержание в ней БВ (N (нитратов), P (фосфатов) и Si (силикатов), все мкг-ат/л), а также показатели состояния доминирующего диатомового фитопланктона *F1* — его обилия (г/м³) и продукции (в мг C/(м³×сут) или мг C/(м²×сут)) за июнь–сентябрь в указанные годы (при разном количестве станций наблюдений в отдельных съемках).

Единицы выражения этих показателей и вычисляемых CNPSi-моделью одинаковы для T_w , °C, но отличаются для концентраций БВ. Поэтому они были приведены к одинаковым формам их выражения: концентрации БВ из мкг-ат/л переводили в мкг N/л и в мкг P/л (умножением на соответствующие значения молекулярных весов N и P).

Вторая подборка данных наблюдений за 2007–2012 гг. [Ильяш и др., 2012; 2016] также включала измерения T_w , °C, содержание тех же БВ (N (нитратов), P (фосфатов) и Si (силикатов), все мкг-ат/л) и показатели диатомового фитопланктона *F1* — его биомассу (в мг C/м³) и дополнительно — в единицах хлорофилла *a* (мг/м³).

Фитопланктон — один из наиболее изученных биоконпонентов морских экосистем, его роль в их функционировании существенна, так как он является основным продуцентом ОБ. Показатели фитопланктона традиционно оценивают трудоемкими аналитическими методами [Руководство..., 1980; Федоров, 1979]. Можно проверить возможность оценки показателей фитопланктона с помощью численных методов — при использовании имитационной CNPSi-модели.

Далее проводили пересчет показателей *F1*, вычисляемых в CNPSi-модели в единицах N, P, Si, в единицы C для сравнения с измерениями за 1972–1991 гг. [Ильяш и др., 2003] и за 2007–2012 гг. [Ильяш и др., 2012; 2016]. Для этого использовали соотношение C : Si : N : P = 106 : 23 : 16 : 1 для биомасс фитопланктона [Redfield et al., 1963] и значения молекулярных весов для химических элементов (C = 12, Si = 28, N = 14, P = 31). Так, пересчет значений биомассы *F1N* в единицы C проводили по уравнению

$$F1N \rightarrow F1C: [F1N \text{ (в мкг N/л)} \times 106 \times 12] / (14 \times 16) = F1C \text{ (мкг C/л или мг C/м}^3\text{)}.$$

Для пересчета в единицы С биомасс $F1$, выраженных в единицах хлорофилла a , использовали соотношение $1 \text{ г С/м}^3 = 20 \text{ мг хлорофилла } a/\text{м}^3$ [Edwards, Brindly, 1996; Edwards, Bees, 2001]. Измерений концентраций хлорофилла a было немного, поэтому сравнения по ним нельзя считать достаточно надежными. Значения обилия $F1$ (или численности фитопланктона, г/м^3) в единицы С пересчитывали с учетом содержания С, равного 6 % в сырой биомассе $F1$ [Федоров, 1979].

Изменения условий среды влияют на значения показателей $F1$ (его обилие, биомассу и продукцию, БП_{F1N}). При расчетах на CNPSi-модели биомассу $F1$ вычисляли в единицах биогенных элементов (N и P) на основе мгновенных потоков БВ, расходуемых на построение фитопланктоном своей биомассы. Потоки подразделяли на положительные (формируют биомассу в пределах рассматриваемого района) и отрицательные (характеризуют привнос в рассматриваемый район биомассы $F1$, сформированной в соседних районах). Таким образом, алгоритм для вычисления продукции БП_{F1N} в CNPSi-модели включал указанные внутренние потоки форм N:

$$\begin{aligned} \text{БП}_{F1(i)} = & \text{UPNF1}(i) \times F1N(i) + \text{LNF1}(i) \times F1N(i) + \text{SNF1}(i) \times F1N(i) + \text{UPF1}(i) \times Z1N(i) + \\ \text{потоки} \rightarrow & \quad (1) \quad (2) \quad (3) \quad (4) \\ & + \text{UPF1}(i) \times Z2N(i) - [Qw(i) \times (F1N(i) - F1N(i+1))/V(i) + [Qwout(i) \times F1N(i)]/V(i, j), \\ \text{потоки} \rightarrow & \quad (5) \quad (6) \quad (7) \end{aligned}$$

где (1), (2), (3), (4) и (5) — соответственно основные потоки, связанные с формированием биомассы $F1N(i)$ — потреблением, выделением веществ, образованием детрита, выеданием зоопланктоном (растительным и хищным) в рассматриваемом i -м районе; (6) — поток, обозначающий влияние биомассы $F1N$, сформированной в соседних районах и привнесенной водными массами в i -й район; (7) — поток биомассы, выносимой водными массами из рассматриваемого i -го района в соседние акватории; i, j — счетчики модели, соответственно для выделенных районов моря и рассматриваемых слоев (для Белого моря не проводили подразделения слоев на верхний и нижний, поэтому $j = 1$).

При расчетах на CNPSi-модели значения БП_{F1} вычисляются на каждом шаге по времени, они суммируются и выдаются на печать для каждого месяца ($\text{мг N}/(\text{л} \times \text{мес})$) и в конце года ($\text{мг N}/(\text{л} \times \text{год})$). В работе [Ильяш и др., 2003] значения продукции $F1$ выражены в $\text{мг С}/(\text{м}^3 \times \text{сут})$ и $\text{мг С}/(\text{м}^2 \times \text{сут})$. Перевод из единиц N в единицы С проводили с учетом стехиометрии соотношений биогенных элементов в природном диатомовом фитопланктоне ($\text{C} : \text{Si} : \text{N} : \text{P} = 106 : 23 : 16 : 1$). В результате получали размерность $\text{г С}/(\text{м}^3 \times \text{мес.})$ (или за год). Делением полученных значений БП_{F1} на количество дней в каждом месяце (или в году) можно ежемесячные (или годовые) значения БП_{F1} перевести в суточные и получить размерность $\text{г С}/(\text{м}^3 \times \text{сут})$. Толщина эвфотического слоя Белого моря составляет от 1.5–5 [34] до 10 м [Белое море..., 1991]. Для получения значения БП_{F1} на единицу площади ее значение на единицу объема вод следует умножить на толщину эвфотического слоя (5 или 10 м), в итоге получим размерность $\text{г С}/(\text{м}^2 \times \text{сут})$. Далее умножением на 365 сут можно получить значение БП_{F1} за год.

По расчетам на CNPSi-модели годовые значения БП_{F1} можно получить сложением ежемесячных БП_{F1} , полученных за продуктивный период. Это будет более точное значение годовой БП_{F1} , чем оценка по единичным измерениям БП_{F1} за отдельные месяцы (или для месяцев, включаемых в вегетационный период), как это обычно делают по единичным измерениям.

При сопоставлении измеренных и расчетных данных, полученных с помощью CNPSi-модели, надо учитывать следующее:

- есть явные несоответствия оценки значений сравниваемых показателей: измеряемые в определенном районе моря показатели характеризуют их изменения в конкретный срок наблюдений между отдельными станциями, а также между сроками наблюдений в разные годы, а расчетные — характеризуют по среднемноголетним изменениям в те-

чение года параметров окружающей среды средние значения в определенное время для всего района;

- также есть несоответствие оценки значений показателей по времени: измеренные показатели отражают результаты исследований в конкретных районах моря в разные годы в определенные сроки (это означает, что от одного срока наблюдений к другому условия среды в разные годы могут даже в одном районе кардинально меняться и существенно влиять на измеряемые характеристики), а расчетные показатели меняются в соответствии с изменениями среднесезонных условий среды, и их внутригодовая динамика связана с закономерной сезонной изменчивостью основных параметров окружающей среды;
- использованы абсолютно разные принципы оценки значений сравниваемых показателей биопродукции $БП_{F1}$: измеренные значения обычно оценивают с помощью трудоемких аналитических методов (кислородный либо радиоуглеродный), а расчетные — на основе потоков БВ при системном анализе вычислениями по алгоритмам, формализованным в CNPSi-модели. Однако итоговые значения $БП_{F1}$, полученные различными методами, оказываются сопоставимыми.

Так как количество сравниваемых показателей нельзя признать статистически достоверным, то с учетом сказанного выше были сформулированы условия, которыми следует руководствоваться при сравнении измеренных и расчетных значений показателей. Результаты сравнения можно признать положительными (означает соответствие оцененных измерений и расчетов), если в конкретный срок наблюдений расчетное значение показателя попадает в диапазон измеряемых значений или ложится вблизи его пределов — нижнего или верхнего (при этом полагаем, что удвоенная разность между измерением и расчетом не должна быть выше его измеренного значения). Обозначим знаком минус (–) несоответствие и знаком плюс (+) соответствие расчетных и измеренных показателей друг другу. Таким образом, для каждого периода в отдельных районах Белого моря сравниваются измеренные и расчетные значения $T_w^{\circ}\text{C}$, случаи лимитирования по N развития F1 (минеральные концентрации $N < P$), показатели F1 (обилие, продукция, биомасса).

Сначала дадим краткую информацию по отдельным периодам и районам моря, а затем оценим соответствие измеренных и вычисленных параметров F1 по районам Белого моря (таблица 1).

Исследуемые годы. Весь период наблюдений (1972–2012 гг.) включает два самостоятельных цикла работ (за 1972–1991 гг. и 2007–2012 гг.): в первом наблюдения проводили в 1972, 1987²–1988, 1989 и 1991 гг., а во втором — в 2007, 2009 и 2012 гг. Далее покажем, сколько всего в каждый год проводилось наблюдений по всем параметрам, и результаты соответствий (со знаками минус и плюс) измеренных и вычисленных значений: 1972 г. — всего 18 (–11, +7), 1987–1988 гг. — 23 (–9, +14), 1989 г. — 14 (–8, +6), 1991 г. — 24 (–12, +12), 2007 г. — 12 (–4, +8), 2009 г. — 12 (–5, +7) и 2012 г. — 16 (–6, +10). Сравнение отрицательных и положительных оценок значений параметров по годам показывает, что для 1972 и 1989 гг. количество отрицательных оценок выше положительных, для 1991 г. — отмечено равенство оценок, для остальных лет — выше количество положительных оценок.

Районы моря. На данных по районам моря проведено в целом 118 сравнений: в Онежском зал. — 28 (или 23.8 %), Двинском зал. и Бассейне — по 24 (по 20.3 %), губе Чупа — 20 (17.0 %), Горле — 9 (7.6 %), в заливах Кандалакшский — 7 (5.9 %) и Мезенский — 6 (5.1 %). Полученные соответствия значений измеренных и расчетных параметров составляют –53 (44.9 %) и +65 (55.1 %) (таблица 1). По снижению положительных оценок соответствий указанных параметров районы моря образуют ряд: Онежский зал. (27.3 %) — Двинский зал. и Бассейн (по 22.7 %) — губа Чупа (10.6 %) — Кандалакшский зал. и Горло (по 7.6 %) — Мезенский зал. (1.5 %). Район Соловецких о-вов при наблюдениях не выделяли, поэтому он не упомянут в таблице 1.

² Наблюдений в 1987 г. мало, поэтому их учитывают совместно с наблюдениями 1988 г.

Таблица 1. Соответствие измеренных значений показателей, оцененных по результатам отдельных съемок за 1972–1991 гг. [Ильяш и др., 2003] и 2007–2012 гг. [Ильяш и др., 2012, 2016] и вычисленных с помощью CNPSi-модели (прочерк — измерений не было; знак «–» — количество несоответствий сравниваемых показателей, знак «+» — напротив, их соответствий)

Период, годы	Показатель	Кандалакшский зал.	Онежский зал.	Двинский зал.	Мезенский зал.
1972 – 2012	$T, ^\circ\text{C}$ (–)	0	5	2	1
– « –	– « – (+)	2 (12.5 %)	4 (25.0 %)	5 (31.3 %)	1 (6.3 %)
– « –	– « – Σ ($\pm$)	2 (5.3 %)	9 (23.7 %)	7 (18.4 %)	2 (5.3 %)
1972 – 2009	$N < P$ (–)	1	1	1	1
– « –	– « – (+)	0	2 (20.0 %)	3 (30.0 %)	0
– « –	– « – Σ ($\pm$)	1 (5.9 %)	3 (17.6 %)	4 (23.5 %)	1 (5.9 %)
1972 – 1991	Обилие $F1$ (–)	0	1	4	2
– « –	– « – (+)	2 (12.5 %)	4 (25.0 %)	0	0
– « –	– « – Σ ($\pm$)	2 (8.0 %)	5 (20.0 %)	4 (16.0 %)	2 (8.0 %)
1972 – 1991	Продукция $F1$ (–)	1	2	1	1
– « –	– « – (+)	1 (11.1 %)	2 (22.2 %)	3 (33.3 %)	0
– « –	– « – Σ ($\pm$)	2 (11.1 %)	4 (22.2 %)	4 (22.2 %)	1 (5.6 %)
2007 – 2012	Биомасса (–)	0	0	0	0
– « –	– « – (+)	0	4 (36.4 %)	3 (27.3 %)	0
– « –	– « – Σ ($\pm$)	0	4 (33.3 %)	3 (25.0 %)	0
2007 – 2012	Хлорофилл a (–)	0	1	1	0
– « –	– « – (+)	0	2 (50.0 %)	1 (25.0 %)	0
– « –	– « – Σ ($\pm$)	0	3 (37.5 %)	2 (25.0 %)	0
Суммарно по всем показателям	Σ (–)	2	10	9	5
	Σ (+)	5 (7.6 %)	18 (27.3 %)	15 (22.7 %)	1 (1.5 %)
	Σ ($\pm$)	7 (5.9 %)	28 (23.8 %)	24 (20.3 %)	6 (5.1 %)

Период, годы	Показатель	Бассейн	Горло	Губа Чупа	Весь водоем, доли в %
1972 – 2012	$T, ^\circ\text{C}$ (–)	6	1	7	– 22 (57.9 %)
– « –	– « – (+)	2 (12.5 %)	2 (12.5 %)	0	+ 16 (42.1 %)
– « –	– « – Σ ($\pm$)	8 (21.0 %)	3 (7.9 %)	7 (18.4 %)	38 (100 %)
1972 – 2009	$N < P$ (–)	1	2	0	– 7 (41.2 %)
– « –	– « – (+)	3 (30.0 %)	0	2 (20.0 %)	+ 10 (58.8 %)
– « –	– « – Σ ($\pm$)	4 (23.5 %)	2 (11.8 %)	2 (11.8 %)	17 (100 %)
1972 – 1991	Обилие $F1$ (–)	0	1	1	– 9 (36.0 %)
– « –	– « – (+)	5 (31.3 %)	2 (12.5 %)	3 (18.7 %)	+ 16 (64.0 %)
– « –	– « – Σ ($\pm$)	5 (20.0 %)	3 (12.0 %)	4 (16.0 %)	25 (100 %)
1972 – 1991	Продукция $F1$ (–)	0	0	4	– 9 (50.0 %)
– « –	– « – (+)	2 (22.2 %)	1 (11.1 %)	0	+ 9 (50.0 %)
– « –	– « – Σ ($\pm$)	2 (11.1 %)	1 (5.6 %)	4 (22.2 %)	18 (100 %)
2007 – 2012	Биомасса (–)	0	0	1	– 1 (8.3 %)
– « –	– « – (+)	3 (27.3 %)	0	1 (9.0 %)	+ 11 (91.7 %)
– « –	– « – Σ ($\pm$)	3 (25.0 %)	0	2 (16.7 %)	12 (100 %)
2007 – 2012	Хлорофилл a (–)	2	0	0	– 4 (50.0 %)
– « –	– « – (+)	0	0	1 (25.0 %)	+ 4 (50.0 %)
– « –	– « – Σ ($\pm$)	2 (25.0 %)	0	1 (12.5 %)	8 (100 %)
Суммарно по всем показателям	Σ (–)	9	4	13	– 52 (44.1 %)
	Σ (+)	15 (22.7 %)	5 (7.6 %)	7 (10.6 %)	+ 66 (55.9 %)
	Σ ($\pm$)	24 (20.3 %)	9 (7.6 %)	20 (17.0 %)	118 (100 %)

Температура воды, T_w , °C. Средние T_w , измеренные при наблюдениях в отдельные годы в 1972–2012 гг. в разные сроки, сравнивали со значениями T_w , вычисленными по среднемноголетним данным. Результаты сравнения показали: всего по районам моря было проведено 38 сравнений, из них –22 (или 57.9 %) и +16 (42.1 %). Наименьшее количество сравнений (по 2) — в заливах Кандалакшский и Мезенский (по 5.3 %), наибольшее (9) — в Онежском зал. (23.7 %). В целом больше отрицательных сравнений зафиксировано для губы Чупа (–7, +0), Бассейна (–6, +2) и Онежского зал. (–5, +4) и, напротив, больше положительных сравнений установлено для заливов Двинский (–2, +5), Кандалакшский (–0, +2) и для Горла (–1, +2) (таблица 1). Приведем несколько сравнений значений T_w — наблюдаемых в разных съемках по районам моря и вычисленных в эти же сроки по среднемноголетним данным: для Кандалакшского зал. два положительных результата включают наблюдения 1989 г. (за 222–227-е сут) и 1991 г. (за 172–191-е сут) со средними T_w соответственно 15.5 и 11.0 °C при расчетных T_w — 13.5 и 11.4 °C; для Онежского зал. в 1991 г. (за 172–191-е сут) эти значения T_w близки расчетным (8.5 и 8.3 °C); для Двинского зал. в 2012 г. (за 191–198-е сут) они также близки (12.67 и 12.58 °C); для Мезенского зал. в 1988 г. (за 202–210-е сут) они составляют 13.0 и 12.66 °C; для Бассейна в 2012 г. (за 191–198-е сут) — 12.7 и 12.83 °C.

Наибольшие отличия в значениях T_w для: Онежского зал. в 2012 г. (166-е сут) средние T_w по наблюдениям и расчетам составили соответственно 0.00 и 5.69 °C; Двинского зал. в 2007 г. (за 238–246-е сут) эти T_w составили 25.12 и 10.44 °C; Мезенского зал. в 1991 г. (за 172–191-е сут) — 7.5 и 10.75 °C; Бассейна в 1989 г. (за 222–227-е сут) — 15.5 и 10.5 °C; в 1991 г. (за 172–191-е сут) — 8.5 и 12.83 °C. Наибольшие отличия в значениях T_w обнаружены для губы Чупа — наблюдаемые в разных съемках значения T_w были выше вычисленных по среднемноголетним данным на 2.9–7.7 °C.

Концентрации БВ (условия $N < P$). Особенность Белого моря — неоднородное распределение концентраций минеральных БВ по акваториям моря к началу вегетационного сезона. Летом возможна неоднократная смена в конкретном районе моря биогенного элемента (Si, N, P), потенциально лимитирующего развитие $F1$ [Аржанова и др., 1991]. Однако нельзя ожидать соответствия концентраций БВ, наблюдаемых в разных съемках [Ильяш и др., 2003, 2012, 2016] и вычисляемых с помощью CNPSi-модели: это обусловлено тем, что значительные колебания концентраций БВ, фиксируемые наблюдениями в пределах каждой акватории моря, нельзя отразить с помощью CNPSi-модели средними концентрациями БВ по акватории рассматриваемого района, так как их значения несопоставимы. Однако тенденции сезонных изменений концентраций БВ наблюдения и расчеты воспроизводят одинаково: летом подавляющая часть N и P в поверхностном слое представлена органическими формами, доля которых от общего их содержания может составлять 80–90 % [Аржанова и др., 1991]. Можно сравнить измеренные и расчетные концентрации БВ и отметить случаи, когда и наблюдения, и расчеты показывают условия N-лимитирования развития $F1$ (или случаи, когда содержание минеральных форм $N < P$). Всего есть 17 одновременных измерений концентраций минеральных форм N и P [Ильяш и др., 2003, 2012, 2016], при их сравнении с расчетами получено: –7 (41.2 %) и +10 (58.8 %). Положительные результаты сравнений (или условий $N < P$) отмечены по 3 раза (или в 30.0 % случаев) в Двинском зал. и Бассейне, по 2 раза (в 20.0 % случаев) — в Онежском зал. и губе Чупа. Это означает, что смена биогенного элемента и N-лимитирования развития $F1$ происходит и в заливах, и в открытых водах Белого моря. Такие условия N-лимитирования развития $F1$ фиксируются наблюдениями, и они воспроизводятся расчетами на CNPSi-модели (таблица 1).

Обилие фитопланктона $F1$ наблюдали во время проведения исследований в 1972–1991 гг., общее число сравниваемых наблюдений и расчетов — 25, из них –9 (36.0 %) и +16 (64.0 %). Однако результат положительных сравнений наблюдаемых и расчетных значений обилия $F1$ несколько отличается: он наибольший (5, или 31.3 %) для Бассейна, 4 (25.0 %) — для Онежского зал., 3 (18.7 %) — для губы Чупа, по 2 (по 12.5 %) — для Кандалакшского зал. и Горла. Положительных оценок по сравнению значений обилия $F1$ нет для заливов Двинский и Мезенский (таблица 1).

«Выпадают» из общего набора данных наблюдений результаты со значительными диапазонами измеренных значений обилия $F1$ (мг C/m^3) в 1972 г. (660–840, 720–3120, 240–1560, 240–1200 соответственно в заливах Онежский и Двинский, Бассейне, Горле, губе Чупа) и в 1988 г. (300–900 — в Двинском зал.). Сравним пределы и отдельные измеренные значения обилия $F1$ с расчетными (в скобках) в разных съемках по районам моря: в Кандалакшском зал. — измеренные значения в 1988 и 1991 гг. — 17.1 и 18.0 и соответствующие им расчетные значения (19.6 и 12.5); в Онежском зал. в 1987, 1988, 1991 гг. — 3.6–18, 6.0–360, 6.0–18 (6.5, 4.5, 8.0), в Бассейне в 1987–1991 гг. — 2.4–84, 18–600, 4.8–30, 1.8–192 (20.3, 23.9, 19.1, 15.2), в Горле в 1988 г. — 6.0–24 (25.4), в губе Чупа в 1988 и 1989 гг. — 30.0–540 и 3.0–31.2 (36.9–40.0 и 36.7). Таким образом, большая часть измеренных в разных съемках по районам моря и расчетных значений обилия $F1$ попадает в диапазон измерений (означает соответствие показателей) (рис. 7, а).

Продукцию фитопланктона, $БП_{F1}$, измеряли в 1972–1991 гг. [Ильяш и др., 2003]. Общее количество сравниваемых случаев — 18, и получено равное количество отрицательных (–9) и положительных (+9) оценок (по 50.0 %). Чаще (по 4 раза) сравнивали показатели для заливов Онежский, Двинский и губы Чупа, по 2 раза — для Кандалакшского зал. и Бассейна, по 1 — для Мезенского зал. и Горла. Чаще (3 раза или 33.3 %) фиксировали положительные оценки сравнений измеренных и расчетных значений $БП_{F1}$ в Двинском зал., по 2 раза (по 22.2 %) — в Онежском зал. и Бассейне и по 1 разу (по 11.1 %) — в Кандалакшском зал. и Горле (таблица 1). Значения пределов измеренных в разные сроки и расчетных (в скобках) значений $БП_{F1}$ (мг С/(м²×сут)) составляют: в Кандалакшском зал. — 40–150 (46.2), в Онежском зал. — 50–200 (64.3) и 40–80 (35.4), в Двинском зал. — 10–580 (30.7), 40–126 (252), 20–600 (252), в Мезенском зал. — 40–90 (165), в Бассейне — 50–300 (103), 8–149 (114), в Горле — 80 (109). Так как есть существенные отличия в методах оценки значений этого параметра, использованных при измерениях и расчетах, следует признать высокую степень их соответствия (рис. 7, б).

Расчетные значения $БП_{F1}$ в единицах С для весеннего (апрель–май) и летнего (июнь–август) периодов, а также в целом для продуктивного сезона (апрель–август) приведены в таблице 2. Наибольшие оцениваемые значения $БП_{F1}$ в весенний и летний сезоны отмечены в разных районах моря. Для весеннего периода по уменьшению значений $БП_{F1}$ (мг С/(м²×сут)) районы моря образуют ряд: губа Чупа (268.9) – Мезенский зал. (257.8) – Двинский зал. (193.1) – Воронка (172.8) – Бассейн (115.5) – Кандалакшский зал. (114.0) – Онежский зал. (113.6) – Соловецкие о-ва (105.3) – Горло (103.6); для летнего периода последовательность районов иная: губа Чупа (297.1) – Двинский зал. (294.8) – Мезенский зал. (165.0) – Воронка (149.9) – Кандалакшский зал. (126.0) – Бассейн (121.8) – Горло (112.3) – Соловецкие о-ва (71.3) – Онежский зал. (51.5). Последовательность, которая была для летнего периода, сохраняется при характеристике изменчивости значений $БП_{F1}$ для всего продуктивного сезона: губа Чупа (284) – Двинский зал. (252.6) – Мезенский зал. (200.7) – Воронка (158.0) – Кандалакшский зал. (120.5) – Бассейн (118.5) – Горло (108.1) – Соловецкие о-ва (84.3) – Онежский зал. (75.8) (таблица 2).

Таблица 2. Оцененные на основе среднесезонных данных расчетами на CNPSi-модели средние значения $БП_{F1}$ для весеннего (месяцы IV–V), летнего (месяцы VI–VIII) периодов и в целом для сезона вегетации (IV–VIII) в разных районах Белого моря (прочерк — нет расчетов)

Весна, IV – V			Лето, VI – VIII			Сезон вегетации, IV – VIII		
мг N л мес	мг С м ² сут	млн т С	мг N л мес	мг С м ² сут	млн т С	мг N л мес	мг С м ² сут	млн т С
1. Кандалакшский зал.								
0.1226	114.0	0.013	0.2042	126.0	0.022	0.3268	120.5	0.036
2. Онежский зал.								
0.1220	113.6	0.063	0.0835	51.5	0.043	0.2055	75.8	0.106
3. Двинский зал.								
0.2074	193.1	0.108	0.4777	294.8	0.249	0.6851	252.6	0.357
4. Мезенский зал.								
0.2769	257.8	0.093	0.2673	165.0	0.090	0.5442	200.7	0.182
5. Соловецкие о-ва								
0.1131	105.3	0.046	0.1155	71.3	0.068	0.2286	84.3	0.093
6. Глубоководный Бассейн								
0.1241	115.5	0.147	0.1973	121.8	0.234	0.3214	118.5	0.381
7. Горло								
0.1113	103.6	0.056	0.1819	112.3	0.092	0.2932	108.1	0.148
8. Воронка								
0.1856	172.8	0.273	0.2428	149.9	0.357	0.4284	158.0	0.630
9. Губа Чупа								
0.2888	268.9	0.001	0.4813	297.1	0.002	0.7701	284.0	0.003
Суммарно районы Белого Моря								
млн т С	–	0.800	–	–	1.157	–	–	1.957

С учетом объемов водных масс, за весь вегетационный сезон значения $БП_{F1}$ (млн. т С) убывают по районам в следующем порядке: Воронка (0.630) – Бассейн (0.381) – Двинский зал. (0.357) – Мезенский зал. (0.182) – Горло (0.148) – Онежский зал. (0.106) – Соловецкие о-ва (0.093) – Кандалакшский зал. (0.036) – губа Чупа (0.003). Приведенные в литературе для летнего периода скорости первичной продукции в Кандалакшском зал. менялись в пределах от 7–126 до 17–374 мг С/(м²×сут) [Дружкова, 2011], а полученное по расчетам значение для лета в этом районе составляет 126 мг С/(м²×сут) (таблица 2). Годовая продукция $F1$ Белого моря по разным оценкам – в пределах 1.5–3 млн т С при периоде вегетации 180 сут [Дружкова, 2011], а по расчетам на CNPSi-модели она составляет ~2.0 и 3.5 млн т С соответственно при периодах вегетации 150 и 180 сут (таблица 2).

Биомассу $F1$ измеряли в 2007–2012 гг. [Ильяш и др., 2012, 2016]. Эти результаты измерений сравнивали с расчетами 12 раз, из них –1 (8.3 %) и +11 (91.7 %) (таблица 1). Общее количество сравниваемых показателей составляло 4 для Онежского зал., по 3 для Двинского зал. и Бассейна, 2 для губы Чупа. Количество положительных сравнений распределено практически также: 4 (или 36.4 %) для Онежского зал., по 3 (по 27.3 %) для Двинского зал. и Бассейна, и 1 (9.0 %) для губы Чупа.

Отметим, что измеренные биомассы $F1$ в пределах каждого района моря определяются неравномерностью условий среды в зависимости от расположения отдельных станций и мест отбора проб воды (устьевая зона впадающих в море рек, прибрежная зона, вершины заливов, открытые участки моря, области масштабных вихревых образований и другие), поэтому измеренные значения показателей $F1$ в конкретный период наблюдений могут существенно отличаться (в несколько десятков раз) на разных станциях. Подобные отличия по расчетам на CNPSi-модели исключены, так как в конкретный период используемые в расчетах среднесезонные условия среды идентичны по всему району. Существенные отличия в расчетных значениях в одном районе могут быть только между отдельными периодами наблюдений, а в один период по конкретному показателю — только между разными районами моря. Например, измеренные пределы биомасс $F1$ в разные съемки менялись и составляли в водах Онежского зал. 1.5–80.7, Двинского зал. — 6.0–90.0, Бассейна — 6.6–171.0 мг С/м³. Расчетные по среднесезонным данным биомассы $F1$ попадали в диапазоны измерений, а пределы их колебаний по районам моря были существенно ниже (4.4–37.1 мг С/м³) (рис. 7, в).

Выводы

Выполненные исследования показали, что CNPSi-модель адекватно описывает сложные биогидрохимические взаимодействия и сезонную динамику основных химических и биологических показателей (составляющих биогидрохимического портрета) в разных районах Белого моря. В настоящее время это один из наиболее важных результатов экологических исследований, полученных с помощью имитационной математической модели. Очень часто результаты описываемых моделями изменений концентраций веществ вообще не анализируют и не сравнивают с измерениями, а сравнение с биологическими параметрами — это вообще большая редкость в математическом моделировании экосистем. Важен результат исследования еще и тем, что данную модель в качестве инструмента можно использовать для изучения как фундаментальных проблем, так и отдельных прикладных актуальных задач. Такие задачи могут быть поставлены перед специалистами в связи с расширяющимися запросами проведения экологических исследований, например, состояния арктических морей и проблем качества их водных ресурсов для разных экспертных оценок в связи с перспективами освоения нефтегазовых морских месторождений и возможными антропогенными воздействиями на водоемы.

Здесь стоит перечислить некоторые подтверждения расчетами ряда известных из наблюдений фактов, важных для характеристики условий развития доминирующего в Белом море диатомового фитопланктона, $F1$:

- расчеты и наблюдения одинаково воспроизводят тенденции сезонных изменений концентраций БВ: летом большая часть N и P в поверхностном слое представлена органи-

ческими формами, доля которых доходит до 80–90 % общего их содержания [Аржанова и др., 1991];

- расчеты показали, что смена N-лимитирования развития $F1$ происходит и в заливах, и в открытых водах Белого моря (такие условия фиксируют также наблюдения в работах [Ильяш и др., 2003, 2012, 2016]);
- расчеты показывают активизацию вегетации диатомовых в первой половине апреля, а наибольшую их численность — в мае (такая же картина установлена по спутниковым наблюдениям);
- расчетная средняя скорость роста биомассы $F1$ в губе Чупа для лета составляет 0.056 сут^{-1} , и это значение практически совпадает с оцененной для лета удельной скоростью фотосинтетической активности диатомового фитопланктона $F1$ (0.05 сут^{-1}) [Ильяш и др., 2003];
- большая часть расчетных значений обилия $F1$ попадает в диапазон значений, измеренных в разных съемках в отдельные годы по районам моря [Ильяш и др., 2003], что означает соответствие сравниваемых показателей;
- особо следует сказать о значениях продукции $F1$:
 - при существенных отличиях в оценках значений этого параметра (при измерениях это аналитические методы, в расчетах — вычисленные потоки БВ для биомассы $F1$) следует признать высокую степень соответствия сравниваемых значений продукции диатомового фитопланктона, несмотря на небольшое их количество [Ильяш и др., 2003];
 - оцененные для лета скорости первичной продукции в Кандалакшском зал. менялись в пределах от 7–126 до 17–374 мг С/(м²×сут) [Дружкова, 2011], а расчетное значение скорости первичной продукции для лета в этом районе составляет 126 мг С/(м²×сут) (таблица 2);
 - годовая продукция $F1$ в Белом море составляет, по разным оценкам, 1.5–3 млн т С при периоде вегетации 180 сут [Дружкова, 2011], по расчетам на CNPSi-модели составляет ~2.0 и 3.5 млн т С соответственно при учитываемых периодах вегетации 150 и 180 сут (таблица 2).

Приемы формализации биогидрохимических процессов, используемые в CNPSi-модели, позволяют воспроизвести близкие к реальным удельные скорости роста биомассы диатомовых водорослей и значения их продукции. Их оценка на практике сопряжена с проведением трудоемких и затратных по времени экспериментов. Моделирование могло бы служить альтернативным подходом, предвещающим выполнение специальных экспериментальных исследований с уточняющими расчетами по более широким программам, составленным под конкретные экспериментальные задачи исследований биогидрохимических процессов.

В связи с выполняемыми в последние годы исследованиями Белого моря, в которых участвуют специалисты ИО РАН и МГУ, на ближайшие годы намечены дальнейшие работы по более детальному использованию CNPSi-модели для биогидрохимических исследований Белого моря. С кафедрой океанологии географического факультета МГУ достигнута договоренность об апробировании океанической гидродинамической модели Принстонского университета для моделирования полей течений (вариант многослойной экосистемы) по имеющимся рядам гидрометеонаблюдений на Белом море. Результаты расчетов на гидродинамической модели позволят воспроизвести на CNPSi-модели динамику биогидрохимических показателей на разных горизонтах и более точно отразить особенности перераспределения в течение года концентраций БВ и биомасс организмов в водной среде.

CNPSi-модель можно использовать в качестве базовой модели для обучения студентов работе с имеющейся гидрометеорологической, гидрохимической, гидробиологической информацией (сбор, обобщение, подготовка для использования в расчетах), выполнению расчетов обобщению полученных результатов (построению графиков распределения концентраций интересующих параметров, иллюстрирующих таблиц по отдельным показателям), формулировке

оцениваемой информации применительно к поставленным задачам экологических исследований состояния морских объектов или их отдельных акваторий и др.

Структура CNPSi-модели очень удобна для выполнения сравнительных исследований условий функционирования разнотипных морских экосистем в современном мореведении [Максимова, 2004]. Используемая входная информация, по которой CNPSi-выполняет расчет, систематизирована по своему предназначению (исходные концентрации веществ, данные по содержанию веществ в разных реках-притоках, скорости поступления веществ из рассредоточенных источников, данные по расходам воды на границах выделенных районов, атмосферные осадки, константы для выполнения расчетов). Такая же систематизация может быть проведена и по результатам вычисления изменений отдельных характеристик (расчетные значения изменений концентраций веществ в разных районах, внутренние и внешние потоки веществ по всем каналам трансформации, учитываемым в уравнениях модели, информация для вычисления балансов веществ — формам N, P, Si, концентрациям растворенного органического C, кислорода, потреблению кислорода отдельными организмами и др.). При обобщении результатов исследований для разных морских экосистем могут быть легко систематизированы как входные параметры для расчетов, так и результаты вычислений по принятым критериям систематизации информации. В результате могут быть получены обобщающие характеристики (по морфометрии, водосборной территории, водообмену и водному балансу), обуславливающие структуру и функционирование морских экосистем (на основе вычисленных балансов веществ и трофических показателей экосистем). Особенно перспективно использование расчетных данных по продукции организмов (гетеротрофные бактерии, три группы фитопланктона, две группы зоопланктона, макрофиты). По этому параметру не так много фактических данных измерений, но они могут быть вычислены по результатам моделирования по используемым входным данным. Это может быть показано результатами расчетов — значениями продукции организмов для каждого месяца (при активном развитии биомасс) и в целом за продуктивный период года. Для каждого исследуемого морского водоема может быть оценено влияние внутреннего круговорота веществ в экосистеме водоема для обеспечения условий функционирования экосистемы в течение года в сравнении с поступлением веществ из внешних источников.

Признательности

Авторы выражают искреннюю признательность Риснику Д. В. (МГУ, биологический факультет) за трудоемкую работу по подготовке рукописи к публикации и проведение тщательной научно-технической редакторской правки первичной версии статьи. Это позволило существенно улучшить качество передачи смыслового содержания данной работы, а также избежать ряда неточностей и погрешностей в представлении важных расчетных параметров, составляющих основу биогидрохимического портрета изучаемой экосистемы Белого моря.

Список литературы (References)

- Айзатуллин Т. А. Формальная химико-кинетическая характеристика процессов регенерации минеральных соединений биогенных элементов // Тр. ИО РАН. — 1967. — Т. 83. — С. 20–37.
Ajzatullin T. A. Formal'naya himiko-kineticheskayay harakteristika processov regeneracii mineral'nyh soedinenij biogennyh elementov [Formal chemical-kinetic characteristics for regeneration processes of biogenic mineral substances] // Trudy Inst. of Oceanology. — 1967. — Vol. 83. — P. 20–37 (in Russian).
- Айзатуллин Т. А. Моделирование внешнеметаболических систем и систем со смешанными связями // Сб. Биохимическая трофодинамика в морских прибрежных экосистемах. — Киев: Наукова думка, 1974. — С. 138–163.
Ajzatullin T. A. Modelirovanie vneshnemetabolicheskikh sistem i sistem so smeshannymi svyaziyami [Modeling externally metabolic systems and systems with mixed bonds]. — Kiev: Naukova Dumka, 1974. — P. 138–163 (in Russian).

- Айзатуллин Т. А., Леонов А. В.* Моделирование биохимического потребления кислорода в пробах морской воды с помощью ЭВМ // Химико-океанографические исследования морей и океанов: сборник. — М.: Наука, 1975. — С. 34–45.
Ajzatullin T. A., Leonov A. V. Modelirovanie biohimicheskogo potrebleniya kisloroda v probax morskoy vody s pomosh'yu EVM [Modeling of biochemical oxygen consumption in marine water samples by help of electronic computer] // Himiko-okeanograficheskie issledovaniya morej i okeanov [In Chemical-oceanographic studies of seas and oceans]: sbornik. — Moscow: Nauka, 1975. — P. 34–45 (in Russian).
- Айзатуллин Т. А., Леонов А. В.* Кинетика биохимической трансформации природных и антропогенных веществ в морской экологической микросистеме (математическое моделирование) // Химико-океанологические исследования: сборник. — М.: Наука, 1977. — С. 169–183.
Ajzatullin T. A., Leonov A. V. Kinetika biohimicheskoy transformacii prirodnyh i antropogennyh veshchestv v morskoy ekologicheskoy mikrosisteme (matematicheskoe modelirovanie) [Kinetics of biochemical transformation of natural and anthropogenic substances in marine ecological microsystem (mathematical simulation)] // Himiko-okeanologicheskie issledovaniya [In Chemical-oceanological studies]: sbornik. — Moscow: Nauka, 1977. — P. 169–183 (in Russian).
- Аржанова Н. В., Грузевич А. К., Сапожников В. В.* Гидрохимические условия в Белом море летом 1991 г. // Комплексные исследования экосистемы Белого моря: сборник. — М.: ВНИРО, 1991. — С. 25–52.
Arzhanova N. V., Gruzevich A. K., Sapozhnikov V. V. Hidrohimicheskie usloviya v Belom more letom 1991 g. [Hydrochemical conditions in the White Sea for summer 1991] // Kompleksnye issledovaniya bol'shyh morskikh ekosistem Rossii [Complex studies of a Russian large marine systems]: sbornik. — Moscow: VNIRO, 1991. — P. 25–52 (in Russian).
- Белое море. Проект «Моря СССР». — М.: Гидрометеиздат, 1991. — Т. 2, вып. 2. — 193 с.
Beloe more. Proekt "Moria SSSR" [The White Sea. Project "Seas of USSR"]. — Moscow: Gidrometeizdat, 1991. — Vol. 2, Issue. 2. — 193 p. (in Russian).
- Гордеев В. В., Филиппов А. С., Кравчишина М. Д. и др.* Особенности геохимии речного стока в Белое море // Система Белого моря: сборник. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. — М.: Научный мир, 2012. — С. 225–308.
Gordeev V. V., Filippov A. S., Kravchishina M. D. et al. Osobennosti geohimii rechnogo stoka v Beloe more [Geochemical features of river runoff into the White Sea] // Sistema Belogo moria: sbornik. Tom II. Vodnaya tolsha i vzaimodeistvuyushie s nej atmosfera, kriosfera, rechnoj stok i biosphere [The White Sea System. Vol. II. The water thickness and their interaction with atmosphere, criosphere, river runoff, and biosphere]. — Moscow: Sci. World, 2012. — P. 225–308 (in Russian).
- Дружкова Е. И.* Биопродуктивность и фитопланктонные сообщества Баренцева, Белого и Карского морей // Комплексные исследования больших морских экосистем России: сборник. — Апатиты: Мурман. Мор. Биол. Ин-т Кольского науч. Центра РАН, 2011. — С. 116–154.
Druzhkova E. I. Bioproduktivnost' i fitoplanktonnye soobshchestva Barentseva, Belogo i Karskogo morei [Bioproduktivty and phytoplankton communities of the Barents, White, and Kara Seas] // Kompleksnye issledovaniya bol'shyh morskikh ekosistem Rossii [Complex studies of a Russian large marine systems]: sbornik. — Apatity: Murmansk Marine Biological Institute. Cola Sci. Centre. RAS, 2011. — P. 116–154 (in Russian).
- Ефимова Л. Е., Демиденко И. А., Жук В. А., Фролова Н. Л.* Гидрохимическая характеристика вод устьевой области р. Онега // Матер. XIX Междунар. конф. (школы) по морской геологии «Геология морей и океанов». — М.: Изд-во ГЕОС, 2011. Т. III. — С. 149–153.
Efimova L. E., Demidenko I. A., Zhuk V. A., Frolova N. L. [Hydrochemical characteristics of water in the mouth zone of the Onega River] // Trudy XIX Mezhdunarodnoj Konferencii (Shkoly) po morskoy geologii «Geologiya morej i okeanov» [Proc. XIX Int. Conf. (School) on Marine Geology «Geology of seas and oceans»]. — Moscow: Izd-vo GEOS, 2011. Vol. III. — P. 149–153 (in Russian).
- Завернина Н. Н., Коробов В. Б.* Факторы, определяющие экологическую ситуацию в Белом море // Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря: матер. X Междунар. конф. Архангельск, 2007. — С. 313–316.
Zavernina N. N., Korobov V. B. Factors Governing the Environmental Situation in the White Sea // Problemy izucheniya, ratsional'nogo ispol'zovaniya i ohrany prirodnykh resursov Belogo morya: mater. X Mezhdunar. konf., Arhangel'sk, 2007 [Problems of Studies, Rational Use, and Protection of White Sea Natural Resources. Mater. X Intern. Conf., Arkhangelsk, 2007]. — P. 313–316 (in Russian).

- Ильяш Л. В., Житина Л. С., Белевич Т. А. и др. Структура фитопланктона Белого моря после летнего цветения: пространственная неоднородность в зависимости от гидрофизических условий // Сибирский экологический журнал. — 2016. — Т. 23, № 6. — С. 888–899.
Iliash L. V., Zhitina L. S., Belevich T. A. et al. Struktura fitoplanktona Belogo moria posle letnego cveteniya: prostranstvennaya neodnorodnost' v zavisimosti ot gydrofizicheskikh uslovij [Phytoplankton structure in the White Sea after summer flowering: the space inhomogeneity in dependence on hydrophysical conditions] // Siberian ecological Journal. — 2016. — Vol. 23, No. 6. — P. 888–899 (in Russian).
- Ильяш Л. В., Житина Л. С., Федоров В. Д. Фитопланктон Белого моря. — М.: Янус-К, 2003.
Iliash L. V., Zhitina L. S., Fediriv V. D. Fitoplankton Belogo moria [Phytoplankton of the White Sea]. — Moscow: Janus-K, 2003 (in Russian).
- Ильяш Л. В., Ратькова Т. Н., Радченко И. Г., Житина Л. С. Фитопланктон Белого моря // Система Белого моря: сборник. Том II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. — М.: Научный мир, 2012. — С. 605–640.
Iliash L. V., Rat'kova T. N., Radchenko I. G., Zhitina L. S. Fitoplankton Belogo moria [Phytoplankton of the White Sea] // Sb. Sistema Belogo moria. Tom II. Vodnaya tolsha i vzaimodeistviyushie s nej atmosfera, kriosfera, rechnoj stok i biosfera [The White Sea System. Vol. II. The water thickness and their interaction with atmosphere, criosphere, river runoff, and biosphere]: sbornik. — Moscow: Sci. World, 2012. — P. 605–640 (in Russian).
- Информационный nsportal.ru — Социальная сеть работников образования. 2017 — Год экологии.
 Informacionnyj nsportal.ru — Social'naya set' rabotnikov obrazovaniya [Social net of education workers. 2017 — Year of ecology] (in Russian).
- Коршенко А. Н., Матвейчук И. Г., Плотникова Т. И. и др. Качество морских вод по гидрохимическим показателям // Ежегодник 2009. — Обнинск: Артифекс, 2010. — 174 с.
Korshenko A. N., Matveichuk I. G., Plotnikova T. I. et al. Kachestvo morskikh vod po gydrohimicheskimi pokazatelyam [Quality of marine water on hydrochemical parameters] // Annual Handbook 2009. — Obninsk: Artipheks, 2010. — 174 p. (in Russian).
- Кузнецов В. С., Мискевич И. В., Зайцева Г. Б. Гидрохимическая характеристика крупных рек бассейна Северной Двины. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 195 с.
Kuznetsov V. S., Miskevich I. V., Zaitseva G. B. Gidrohimicheskaya haracteristika krupnyh rek basselna Severnoj Dviny [Hydrochemical characteristics of large rivers of the Northern Dvina Basin]. — Leningrad: Gydrometeoizdat, 1991. — 195 p. (in Russian).
- Леонов А. В. Математическое моделирование трансформации соединений фосфора в пресноводных экосистемах (на примере оз. Балатон). — М.: Наука, 1986. — 152 с.
Leonov A. V. Matematicheskoe modelirovanie transformacii soedinenij fosfora v presnovodnyh ekosistemah (na primere oz. Balaton) [Mathematical simulation of phosphorus substance transformation in freshwater ecosystems (exemplified lake Balaton)]. — Moscow: Nauka, 1986. — 152p. (in Russian).
- Леонов А. В. Математическое моделирование процессов биотрансформации веществ в природных водах // Водные ресурсы. — 1999. — Т. 26, № 5. — С. 624–630.
Leonov A. V. Mathematical Modeling of Substance Biotransformation in Natural Waters // Water Resources. — 1999. — Vol. 26, No. 5. — P. 558–564. (Original Russian Paper: Leonov A. V. Matematicheskoe modelirovanie processov biotransformacii veshchestv v prirodnyh vodah // Vodnye Resursy. — 1999. — Vol. 26, No. 5. — P. 624–630.)
- Леонов А. В. Моделирование природных процессов на основе имитационной гидроэкологической модели трансформации соединений С, N, P, Si: учебное пособие. — Южно-Сахалинск: СахГУ, 2012. — 148 с.
Leonov A. V. Modelirovanie prirodnyh processov na osnove imitacionnoj gidroekologicheskoy modeli transformacii soedinenij C, N, P, Si: uchebnoe posobie [Modeling of natural processes on the base of simulation hydroecological model of the C, N, P, Si substance transformations. Manual Handbook]. — Uzhno-Sakhalinsk: Sakhalinsk State University, 2012. — 148 p. (in Russian).
- Леонов А. В., Пищальник В. М., Чичерина О. В. Биогидрохимия морской среды и особенности трансформации биогенных веществ и нефтяных углеводородов на юго-восточном шельфе Сахалина // Водные ресурсы. — 2016. — Т. 43, № 2. — С. 164–187.
Leonov A. V., Pishchal'nik V. M., Chicherina O. V. Biogeochemistry of marine environment transformations of biogenic substances and oil hydrocarbons on the southeastern Sakhalin shelf // Water Resources. — 2016. — Vol. 43, No. 2. — P. 306–327. (Original Russian Paper: Leonov A. V. et al. Biogehimiya morskoy sredy i osobennosti transformacii biogennyh veshchestv i nephtyannyh uglevodorodov na ugo-vostochnom shelfe Sahalina // Vodnye Resursy. — 2016. — Vol. 43, No. 2. — P. 164–187.)

Леонов А. В., Сапожников В. В. Биогидрохимическая модель трансформации органогенных веществ и ее использование для расчета первичной продукции в экосистеме Охотского моря // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря: сборник. — М.: ВНИРО, 1997. — С. 143–166.

Leonov A. V., Sapozhnikov V. V. Biogidrohimičeskaya model' transformacii organogennyh veshchestv i ee ispol'zovanie dlia rascheta pervichnoj produkcii v ekosisteme Ohotskogo moria [Biohydrochemical model of organogenic substance transformations and its application for the primary production calculation in the Sea of Okhotsk ecosystem] // Kompleksnye issledovaniya ekosistemy Ohotskogo moria [In Complex studies of the Sea of Okhotsk Ecosystem]: sbornik. — Moscow: VNIRO, 1997. — P. 143–166 (in Russian).

Леонов А. В., Семеняк Л. В., Чичерина О. В. Углеводороды в Белом море: их поступление и трансформация в морской среде в разных районах // Водные ресурсы. — 2017. — Т. 44, № 1. — С. 38–62.

Leonov A. V., Semenyak L. V., Chicherina O. V. Hydrocarbons in the White Sea: their inflow and transformation in marine environment in different regions // Water Resources. — 2017. — Vol. 44, No. 1. — P. 78–100. (Original Russian Paper: Leonov A. V. et al. Uglevodorody v Belom more: ih postuplenie i transformaciya v morskoy srede v raznyh rajonah // Vodnye Resursy. — 2017. — Vol. 44, No. 1. — P. 38–62.)

Леонов А. В., Филатов Н. Н., Здоровеннов Э. Е., Здоровеннова Р. Е. Функционирование экосистемы Белого моря: исследование на основе математической модели трансформация органогенных веществ // Водные ресурсы. — 2004. — Т. 31, № 5. — С. 556–575.

Leonov A. V., Filatov N. N., Zdorovennov R. E., Zdorovennova G. E. Functioning of the White Sea Ecosystem: studying the transformations of organogenic substances using a mathematical model // Water Resources. — 2004. — Vol. 31, No. 5. — P. 511–530. (Original Russian Paper: Leonov A. V. et al. Funkcionirovanie ekosistemy Belogo moria: issledovanie na osnove matematicheskoy modeli transformacii organogennyh veshchestv // Vodnye Resursy. — 2004. — Vol. 31, No. 5. — P. 556–575.)

Леонов А. В., Филатов Н. Н., Здоровеннов Э. Е., Здоровеннова Р. Е. Математическое моделирование условий функционирования экосистемы губы Чупа Белого моря: трансформация органогенных веществ и биопродуктивность морской среды // Водные ресурсы. — 2006. — Т. 33, № 5. — С. 589–614.

Leonov A. V., Filatov N. N., Zdorovennov R. E., Zdorovennova G. E. Mathematical modeling of ecosystem functioning conditions in the Chupa Estuary of the White Sea: transformations of organogenic substances and bioproductivity of the marine environment // Water Resources. — 2006. — Vol. 33, No. 5. — P. 543–567. (Original Russian Paper: Leonov A. V. et al. Matematicheskoe modelirovanie uslovij funkcionirovaniya ekosistemy guby Chupa Belogo moria: transformaciya organogennyh veshchestv i bioproduktivnost' morskoy sredy // Vodnye Resursy. — 2006. — Vol. 33, No. 5. — P. 589–614.)

Леонов А. В., Чичерина О. В. Математическое моделирование трансформации нефтяных углеводородов в разных районах Белого моря // Водные ресурсы. — 2013. — Т. 40, № 1. — С. 36–61.

Leonov A. V., Chicherina O. V. Mathematical modeling of oil hydrocarbon transformations in different parts of the White Sea // Water Resources. — 2013. — Vol. 40, No. 1. — P. 31–53. (Original Russian Paper: Leonov A. V. et al. Matematicheskoe modelirovanie transformacii neftiannyh uglevodorodov v raznyh rajonah Belogo moria // Vodnye Resursy. — 2013. — Vol. 40, No. 1. — P. 36–61.)

Максимова М. П. Сравнительная гидрохимия морей // Новые идеи в океанологии: сборник. — М.: Наука, 2004. — Т. 1. Физика, химия, биология. — С. 168–189.

Maksimova M. P. Sravnitel'naya gidrohimiy morej [Comparative hydrochemistry of seas] // Noyve idei v okeanologii [New ideas in oceanology]: sbornik. — Moscow: Nauka, 2004. — Tom 1. Fizika, himiya, biologiya. — P. 168–189 (in Russian).

Мискевич И. В. Оценка влияния сброса сточных вод Соломбальского ЦБК на водоснабжение города Архангельска и других промышленных пунктов. — Архангельск, 2008. — С. 68.

Miskevich I. V. Ocenka vliyaniya sbrosa stochnyh vod Solombal'skogo CBK na vodocnabzhenie goroda Arkhangel'ska i drugih promyshlennyh punktov [Estimation of the influence of the sewage water discharge from Solombala CBK on the water supply of Arkhangel'sk and other industrial settlements]. — Arkhangel'sk, 2008. — P. 68 (in Russian).

Немировская И. А. Углеводороды в океане (снег – лед – вода – взвесь – донные осадки). — М.: Научный мир, 2004. — 328 с.

Nemirovskaya I. A. Uglevodorody v okeane (sneg – led – voda – vzves' – donnye osadki) [Hydrocarbons in oceans (snow – ice – water – suspension – sediments)]. — Moscow: Nauchnyj Mir, 2004. — 328 p. (in Russian).

- Океанографические условия и биологическая продуктивность Белого моря. — Мурманск: ПИНРО, 1991. — 115 с.
Okeanograficheskie usloviya i biologicheskaya produktivnost' Belogo moria [Oceanographic conditions and biological productivity of the White Sea]. — Murmansk: PINRO, 1991. — 115 p. (in Russian).
- Потапова И. Ю. Биогенные элементы и органическое вещество в воде прибрежной части Белого моря // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: матер. V Всерос. симп. с международным участием. 10–14.IX.2012 г. — Петрозаводск: ИВПС, Карельский НЦ РАН, 2012. — С. 274–276.
Potapova I. Yu. Biogennyye elementy i organicheskoe veshchestvo v vode pribrezhnoy chasti Belogo moria. [Biogenic elements and organic matter in the coastal waters of the White Sea] // Organicheskoe veshchestvo i biogennyye elementy vo vnytreennykh vodoemakh i morskikh vodakh [Organic matter and biogenic elements into inland water bodies and marine waters]: mater. V Vseros. Symp. With Internat. Particip. 10–14.IX.2012. — Petrozavodsk: Inst. Wat. Probl. North. Karel. Sci. Centre RAS, 2012. — P. 274–276 (in Russian).
- Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений. — Л.: Гидрометеиздат, 1980.
Rukovodstvo po metodam biologicheskogo analiza morskoy vody i donnykh otlozhenij [Handbook on biological methods of the analysis of sea water and sediment]. — Leningrad: Gydrometeoizdat, 1980.
- Ружникова Н. Н., Морева О. Ю. Содержание биогенных элементов в снежном покрове на территории водосбора рек Белого моря в марте–апреле 2013 года // Геология морей и океанов: матер. XX Междунар. конф. (школы) по морской геологии. — М.: Изд-во ГЕОС, 2013. — Т. III. — С. 232–236.
Ruzhnikova N. N., Moreva O. Ju. Content of biogenic elements in snow cover on the river watershed area of the White sea during March–April 2013 // Geologiya morej i okeanov: trudy XX Mezhdunarodnoy Konferencii (Shkoly) po morskoy geologii [Geology of seas and oceans: proc. XIX Int. Conf. (School) on Marine Geology]. — Moscow: Izd-vo GEOS, 2013. — Vol. III. — P. 232–236 (in Russian).
- Сапожников В. В. Морская гидрохимия в XXI в. // Новые идеи в океанологии: сборник. — М.: Наука, 2004. — Т. 1. Физика, химия, биология. — С. 159–167.
Sapozhnikov V. V. Morskaya gidrokhimiya v XXI v. [Marine hydrochemistry in XXI century]. — Moscow: Nauchnyj Mir, 2004. — Tom 1. Fizika, himiya, biologiya. — P. 159–167 (in Russian).
- Система Белого моря. Т. 1. Природная среда водосбора Белого моря. — М.: Научный мир, 2010. — 480 с.
Sistema Belogo moria. Tom I. Prirodnaya sreda vodosbora Belogo moria [The White Sea System. Vol. I. The Natural Environment of the White Sea Watershed]. — Moscow: Nauchnyj mir, 2010. — 480 p. (in Russian).
- Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. — М.: Научный мир, 2012. — 784 с.
Sistema Belogo moria. Tom II. Vodnaya tolsha i vzaimodeystvuyushie s nej atmosfera, kriosfera, rechnoj stok i biosfera [The White Sea System. Vol. 2. Water strata and its interaction with atmosphere, cryosphere, river runoff and biosphere]. — Moscow: Nauchnyj mir, 2012. — 784 p. (in Russian).
- Система Белого моря. Т. III. Рассеянный осадочный материал гидросферы, микробные процессы и загрязнение. — М.: Научный мир, 2013. — 608 с.
Sistema Belogo moria. Tom III. Rasseyannyj osadochnyj material gidrosfery, mikrobnyye processy i zagriaznenue [The White Sea System. Vol. III. Dispersed sedimentary hydrosphere material, microbial processes and pollution]. — Moscow: Nauchnyj mir, 2013. — 608 p. (in Russian).
- Соболевская А. П., Коробицина Ю. С., Мокротоварова О. И. и др. Белое море // Качество вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2010. — Обнинск: Арטיפекс, 2011. — С. 123–129.
Sobolevskaya A. P., Korobitsina Ju. S., Mokrotovarova O. I. et al. Beloe more [The White Sea] // Water quality on hydrochemical parameters. Annual Handbook 2010. — Obninsk: Artipeks, 2010. — P. 123–129 (in Russian).
- Соболевская А. П., Коробицина Ю. С., Мокротоварова О. И. и др. Белое море // Качество вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2012. — Обнинск: Арטיפекс, 2013а. — С. 105–111.
Sobolevskaya A. P., Korobitsina Ju. S., Mokrotovarova O. I. et al. Beloe more [The White Sea] // Water quality on hydrochemical parameters. Annual Book 2012. — Obninsk: Artipeks, 2013. — P. 105–111 (in Russian).

- Соболевская А. П., Котова Е. И., Панченко О. А. и др. Белое море // Качество вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2012. — М.: Наука, 2013б. — С. 122–128.
Sobolevskaya A. P., Kotova E. I., Panchenko O. A. et al. Beloe more [The White Sea] // Water quality on hydrochemical parameters. Annual Book 2012. — Moscow: Nauka, 2013. — P. 122–128 (in Russian).
- Соболевская А. П., Коробицина Ю. С., Скрипник Е. Н. и др. Белое море // Качество вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2011. — Обнинск: Артифекс, 2012. — С. 119–125.
Sobolevskaya A. P., Korobitsina Yu. S., Skripnik E. N. et al. Beloe more [The White Sea] // Water quality on hydrochemical parameters. Annual Book 2011. — Obninsk: Artipheks, 2012. — P. 119–125 (in Russian).
- Федоров В. Д. О методах изучения фитопланктона и его активности. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. — 168 с.
Fedorov V. D. O metodah izucheniya fitoplanktona i ego aktivnosti [About methods for the study of phytoplankton and its activity]. — Moscow: Izd-vo Moscow State Univ., 1979. — 168 p. (in Russian).
- Чульцова А. Л. Оценка состояния биогенных элементов в зимнюю межень 2007–2008 гг. в дельте реки Северной Двины // Геология морей и океанов: матер. XVIII Междунар. конф. (школы) по морской геологии. — М.: Изд-во ГЕОС, 2009. — С. 268–271.
Chul'tsova A. L. Estimation of biogenic element states in winter period 2007–2008 in the delta of Severnaya Dvina River // Geologiya morej i okeanov: trudy XVIII Mezhdunarodnoj Konferencii (Shkoly) po morskoy geologii [Geology of seas and oceans: proc. XVIII Int. Conf. (School) on Marine Geology]. — Moscow: Izd-vo GEOS, 2009. — P. 268–271 (in Russian).
- Чульцова А. Л. Исследование химических показателей снега, льда и воды устьевой области реки Северная Двина в зимнюю межень 2011 г. // Геология морей и океанов: матер. XIX Междунар. конф. (школы) по морской геологии. — М.: Изд-во ГЕОС, 2011. — Т. III. — С. 290–294.
Chul'tsova A. L. Study of chemical parameters of snow, ice, and water in the mouth zone of Severnaya Dvina River in winter 2011 // Geologiya morej i okeanov: trudy XIX Mezhdunarodnoj Konferencii (Shkoly) po morskoy geologii [Geology of seas and oceans: proc. XIX Int. Conf. (School) on Marine Geology]. — Moscow: Izd-vo GEOS, 2011. — P. 290–294 (in Russian).
- Чульцова А. Л. Уровень накопления и содержание биогенных элементов в конце зимы в снеговом, ледовом покровах и воде устьевой области реки Северная Двина (весна 2011 г.) // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: матер. V Всерос. симп. с международным участием. 10–14.IX.2012 г. — Петрозаводск: ИВПС, Карельский НЦ РАН, 2012. — С. 289–293.
Chul'tsova A. L. Uroven' nakopleniya i coderzhanie biogennyh elementov v konce zimy v cnegovom, ledovom pokrovah i vode ust'evoy oblasti reki Severnaya Dvina (vesna 2011 g.) [Accumulation and content of biogenic elements at the winter end in snow, ice covers and in water of mouth zone of the Severnaya Dvina River (spring 2011)] // Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnytreennykh vodoemah i morskikh vodah [Organic matter and biogenic elements into inland water bodies and marine waters]: mater. V Vseros. Symp. With Internat. Particip. 10–14.IX.2012. — Petrozavodsk: Inst. Wat. Probl. North. Karel. Sci. Centre RAS, 2012. — P. 289–293 (in Russian).
- Чульцова А. Л., Скибинский Л. Э. Распределение биогенных элементов в период летней межени в геобарьерной зоне «река Северная Двина – Двинский залив Белого моря» // Геология морей и океанов: матер. XVII Междунар. конф. (школы) по морской геологии. — М.: Изд-во ГЕОС, 2007. — Т. III. — С. 291–294.
Chul'tsova A. L., Skibinskiy L. E. [Distribution of biogenic elements in summer period within the geobarrier zone “Severnaya Dvina River – Dvina Bay of the White Sea”] // Geologiya morej i okeanov: trudy XVII Mezhdunarodnoj Konferencii (Shkoly) po morskoy geologii [Geology of seas and oceans: proc. XVII Int. Conf. (School) on Marine Geology]. — Moscow: Izd-vo GEOS, 2007. — P. 291–294 (in Russian).
- Чульцова А. Л., Скибинский Л. Э. Распределение биогенных веществ в снежном и ледовом покровах устьевой области реки Северной Двины: матер. Всерос. науч. конф., посвященной Междунар. Полярному году (2007–2008 гг.) «Исследования Российской Арктики: прошлое, настоящее и будущее». — Архангельск: Арх. Центр РГО, 2008. — С. 205–211.
Chul'tsova A. L., Skibinskiy L. E. Distribution of biogenic elements in snow and ice covers of the mouth zone of Severnaya Dvina River: mater. Vseros. Sci. Conf. for Intern. Polar Year (2007–2008) “Study Russian Arctic: past, present and future». — Arkhangel'sk: Arkh. Centre Rus. Geogr. Soc., 2008. — P. 205–211 (in Russian).

Шевченко В. П., Широкова Л. С., Здорovenнов Р. Э. и др. Распределение растворенного Сорр в маргинальном фильтре реки Кеми (Белое море) в летний период // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: матер. V Всерос. симп. с международным участием. 10–14.IX.2012 г. — Петрозаводск: ИВПС, Карельский НЦ РАН, 2012. — С. 279–282.

Shevchenko V. P., Shirokova L. S., Zdorovennov R. E. et al. Raspredelenie rastvorennogo organicheskogo C v marginal'nom fil'tre reki Kem' (Beloe more) v letnij period [Distribution of dissolved organic C in margin filter of Cem' River (The White Sea) during summer period] // Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnytretnih vodoemah i morskikh vodah [Organic matter and biogenic elements into inland water bodies and marine waters]: mater. V Vseros. Symp. With Internat. Particip. 10–14.IX.2012. — Petrozavodsk: Inst. Wat. Probl. North. Karel. Sci. Centre RAS, 2012. — P. 279–282 (in Russian).

Широкова Л. С., Покровский О. С., Чунаков А. В., Воробьева Т. Я. Распределение форм растворенного углерода в устьевой части реки Северная Двина // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: матер. V Всерос. симп. с международным участием. 10–14.IX.2012 г. — Петрозаводск: ИВПС, Карельский НЦ РАН, 2012. — С. 285–289.

Shirokova L. S., Pokrovskii O. S., Chupakov A. V., Vorob'eva T. Ja. Raspredelenie rastvopennykh form C v ust'evoy chasti reki Severnaya Dvina [Distribution of dissolved carbon forms in mouth zone of Severnaya Dvina River] // Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnytretnih vodoemah i morskikh vodah [Organic matter and biogenic elements into inland water bodies and marine waters]: Mater. V Vseros. Symp. With Internat. Particip. 10–14.IX.2012. — Petrozavodsk: Inst. Wat. Probl. North. Karel. Sci. Centre RAS, 2012. — P. 285–289 (in Russian).

Artemyev V. E., Romankevich E. A. Seasonal variations in the transport of organic matter in North Dvina estuary // Transport of carbon and minerals in major world rivers / Eds. Degens et al. Mitt. Geol.-Palaont. Inst. Univ. Hamburg. SCOPE/UNEP Sonderband. Heft 66. — Hamburg, 1988. — P. 177–184.

Edwards A. M., Bees M. A. Generic dynamics of a simple plankton population model with a non-integer exponent of closure // Chaos, Solitons and Fractals. — 2001. — Vol. 12. — P. 289–300.

Edwards A. M., Brindley J. Oscillatory behaviour in a three-component plankton population model // Dynamics and Stability of Systems. — 1996. — Vol. 11, No. 4. — P. 347–370.

Lobbess J. M., Fitzmar H. P., Kattner G. Biogeochemical characteristics of dissolved and particulate organic matter in Russian rivers entering the Arctic Ocean // Geochemica et Cosmochimica Acta. — 2000. — Vol. 64, No. 17. — P. 2973–2983.

Redfield A. C., Ketchum B. H., Richards F. A. The influence of organisms on the composition of the sea water // The Sea. Ed. M.N.Hill. — New York, 1963. — Vol. 2. — P. 26–77.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Краткое описание CNPSi-модели

1. Общий вид уравнения CNPSi-модели

для описания изменения концентраций веществ C_{ijk}

$$dC_{ijk}/dt = R_{ijk} + \text{LOAD}_{ijk} + \text{TR}_{ijk}, \quad (1)$$

где i — счетчик числа выделенных акваторий (максимально возможное число акваторий равно 10); j — счетчик модели для рассмотрения выделенных слоев ($j = 2$); k — счетчик для рассматриваемых компонентов модели ($k = 29$); R_{ijk} , LOAD_{ijk} и TR_{ijk} — скорости изменения концентраций веществ C_{ijk} : соответственно за счет биотрансформации компонентов, поступления веществ из внешних источников и пространственного (горизонтального и вертикального) переноса, все в мг элемента/(л сут).

2. Структура уравнений для описания процессов биотрансформации веществ, R_{ijk}

(2.1) Динамика биомасс B_k

$$dB_k/dt = (UP - L - S) \times B_k - G \times ZO, \quad (2)$$

где UP, L, S и G — для организмов удельные скорости суммарного потребления веществ, выделения продуктов обмена, отмирания биомасс и их выедания зоопланктоном соответственно, все сут^{-1} ; $UP = UP_o + UP_m + UP_d$ (UP_o , UP_m и UP_d — скорости потребления организмами органических фракций, минеральных фракций и детрита соответственно (сут^{-1}); $L = L_o + L_m$ (L_o и L_m — скорости выделения организмами органических и минеральных веществ соответственно (сут^{-1})).

$$UP = K(T, \text{Light}) / (1 + B_C / \text{PoolC} + B_N / \text{PoolN} + B_P / \text{PoolP} + B_{Si} / \text{PoolSi}), \quad (3)$$

$$\text{PoolC} = \sum d_k \times C_k; \text{PoolN} = \sum d_k \times N_k,$$

$$\text{PoolP} = \sum d_k \times P_k; \text{PoolSi} = \sum d_k \times Si_k,$$

$$L = r \times UP; r = a \times UP / (1 + b \times UP) + (1 - a/b),$$

$$S = q + m \times r + g \times B / UP.$$

PoolC, PoolN, PoolP и PoolSi — запасы соединений C, N, P и Si соответственно для организмов; C_k , N_k , P_k , Si_k — условное обозначение отдельных субстратов, включающих указанные биогенные элементы; d_k — коэффициенты предпочтения в потреблении отдельных субстратов организмами; a, b, q, m, g — константы.

(2.2) Механизм регуляции активности организмов

– отношение «биомасса/субстрат»:

$$(B_C / \text{PoolC}; B_N / \text{PoolN}; B_P / \text{PoolP}; B_{Si} / \text{PoolSi}),$$

$$-r = f(UP); -S = f(r, UP); -L = f(UP), -S = f(UP).$$

(2.3) Динамика химических веществ C_{ijk} и детрита

органических фракций —

$$dC_{ijk} / dt = L_o \times B_k - UP_o \times B_k + K_k \times D, \quad (4)$$

минеральных фракций —

$$dC_{ijk} / dt = L_m \times B_k - UP_m \times B_k, \quad (5)$$

детрита D —

$$dD/dt = \sum S_k \times B_k - K_k \times D - \sum UP_d \times B_k - K_{sed} \times D. \quad (6)$$

3. Уравнения для расчета скоростей поступления веществ, $LOAD_{ijk}$

$$LOAD_{ijk} = f_{ijk} \times (Q_{pr} \times C_r / V_i) + CZ_{ijk} + W_{ijk}, \quad (7)$$

$$W_{ijO_2} = -K_{014} \times (O_2 - O_{2n}), \quad (8)$$

$$O_{2n} = 14.61996 - 0.4042 \times T + 0.00842 \times T^2 - 0.00009 \times T^3, \quad (9)$$

$$W_{ijN_2} = -K_{033} \times (N_2 - N_{2atm}), \quad (10)$$

$$N_{2atm} = 22.33 \exp(-0.0207 \times T). \quad (11)$$

Первый, второй и третий члены в правой части уравнения (7) — соответственно скорости поступления веществ в изучаемую акваторию с атмосферной влагой, из рассредоточенных источников и за счет обмена с атмосферой (для растворенных газов) (все мг элемента/(л сут)); V_i — объем воды в изучаемом районе, км^3 ; O_{2n} и N_{2atm} — соответственно концентрации растворенных в воде кислорода и азота, мг/л; T — температура воды, °C; K_{014} и K_{033} — константы скорости аэрации водной среды (соответственно по кислороду и азоту) за счет обмена с атмосферой; f_{ijk} — регулировочные коэффициенты для учета переноса веществ; K_i — константа.

4. Уравнения для транспортного члена, TR_{ijk}

$$TR_{ijk} = f_k \times [TRIN_{ijk} + TRUP_{ijk} + TRSEC_{ijk} + TROUT_{ijk}], \quad (12)$$

$$TRIN_k = QWIN_{ij} \times CIN_{ij} / V_{ij}, \quad (13)$$

$$TRUP_k = \text{abs}(QWUP_j) \times (CM_{ki3-j} - Y_k) / V_{ij}, \quad (14)$$

$$TRSEC_{ki} = [(QW_{ij} \times CM_{kj}) - (QW_{ij} \times Y_k)] / V_{ij}, \quad (15)$$

$$TROUT_k = -(QWOUT_{ij} \times Y_k) / V_{ij}, \quad (16)$$

где $TRIN_{ijk}$, $TRUP_{ijk}$, и $TRSEC_{ijk}$ — соответственно скорости поступления веществ в рассматриваемые акватории извне с водами притоков, за счет вертикального обмена с нижележащим слоем и переноса из соседних районов в пределах изучаемой морской экосистемы; $TROUT_{ijk}$ — потери веществ при выносе водным потоком через внешние границы водной системы (все в мг элемента/(л сут)); $QWIN_{ij}$ — расходы воды внешних притоков в соответствующих районах моря; $QWUP_{ij}$ — составляющая вертикального переноса вещества; $QWOUT_{ij}$ — расходы воды на внешних границах моря для расчета выноса веществ из морской системы; QW_{ij} — расходы воды через границы выделенных районов в морской системе (все в км³/мес.); Y_k — мгновенные концентрации веществ в соответствующих районах моря в рассматриваемом слое воды, мг элемента/л; CM_{ki3-j} — мгновенные концентрации веществ в соответствующих районах моря в нижнем (или верхнем) слое столба воды, мг элемента/л (требуются для расчета количества вещества, участвующего в переносе по вертикали); CIN_{ki} — концентрации рассматриваемых компонентов в водах притоков, мг элемента/л; V_{ij} — объем вод рассматриваемых районов и слоев, км³; f_k — управляющие параметры адвективного переноса веществ (безразмерные).

Таким образом, CNPSi-модель рассчитывает для разных районов изучаемой морской системы внутригодовую динамику концентраций химических веществ, биомасс организмов в водной среде, а также мгновенные скорости процессов, ответственных за изменение концентраций веществ. В специальных встроенных в модель алгоритмах предусмотрены возможности оценки внутренних и внешних потоков веществ, времен оборота всех рассматриваемых в модели химических и биологических компонентов, удельных скоростей продукции организмов, значений сезонной и годовой продукции рассматриваемого в модели сообщества организмов, участвующих в биотрансформации БВ и ОВ. На основе полученной при реализации CNPSi-модели информации представляется возможным составить и корректно рассчитать балансы соединений биогенных элементов в разных районах и в целом в изучаемой морской системе.