

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 556.078:574.5 (268.46)

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА GREEN JASMINE ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМ БЕЛОГО МОРЯ

**А. В. Толстик¹, И. А. Чернов², С. А. Мурзина³,
Д. М. Мартынова⁴, Н. Г. Яковлев⁵**

¹ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

² Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН,
Петрозаводск

³ Институт биологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

⁴ Зоологический институт РАН, Санкт-Петербург

⁵ Институт вычислительной математики РАН, Москва

Комплекс Green JASMINE предназначен для получения согласованных данных по термогидродинамике и биогеохимическим параметрам Белого моря, количественного выражения потоков вещества внутри водоема и на границе с Баренцевым морем. В качестве термогидродинамического блока используется модель JASMINE, основанная на конечно-элементной модели Северного Ледовитого океана (FEMAO). Модель настроена на условия Белого моря и сопряжена с блоком динамики пелагической экосистемы, в качестве которого применяется итальянская модель BFM. В BFM использован стехиометрический подход для математического описания состояния экологической системы: неизвестными являются концентрации тех или иных элементов в составе различных функциональных групп, таких как, например, диатомовые водоросли, крупный фитопланктон, цианобактерии, бактериопланктон, гетеротрофные жгутиконосцы, растворенное в воде косное органическое или неорганическое вещество. Полный список переменных насчитывает пять десятков, при этом описаны циклы углерода, азота, фосфора, кремния, а также хлорофилл *a* в составе автотрофных организмов, учитываются растворенный в воде кислород и сероводород. Отмечается адекватное воспроизведение термогидродинамических параметров Белого моря. Качественное модельное распределение хлорофилла *a* и первичной продукции также в целом соответствует реальной картине его распределения. Разрабатываемый программный комплекс Green JASMINE помогает решать важные задачи, связанные с функционированием экосистем Белого моря. Его особенностью является возможность рассматривать распределение температуры, солености, льда и состояние экосистем в зависимости от сценариев изменения внешних факторов. Функционирует блок переноса примеси, включая перенос нефти, что особенно актуально при моделировании экологических катастроф. Кроме того, комплекс обладает значительной гибкостью и мощным потенциалом для расширения.

Ключевые слова: Белое море; моделирование; пелагическая экосистема; Green JASMINE; BFM.

A. V. Tolstikov, I. A. Chernov, S. A. Murzina, D. M. Martynova, N. G. Yakovlev. DESIGN AND APPLICATION OF THE GREEN JASMINE COMPLEX FOR THE STUDY AND PREDICTION OF THE ECOSYSTEMS STATE AND VARIABILITY OF THE WHITE SEA

The Green JASMINE complex is designed to produce consistent data on the thermo-hydrodynamical and biogeochemical parameters of the White Sea, as well as to assess the matter fluxes within the sea and in the areas adjacent to the Barents Sea. The JASMINE model serves as the Hydrodynamical block and is based on the finite element model of the Arctic Ocean (FEMAO). It is coupled with the biogeochemical block, which is the BFM model maintained and developed by the BFM Consortium. BFM uses the stoichiometric approach for description of the state of ecosystem: variables are concentrations of elements or substances in different functional groups, e. g., diatoms, large phytoplankton, cyanobacteria, pelagic bacteria, heterotrophic flagellates, dissolved organic or inorganic matter, including oxygen and hydrogen sulfide, etc. The total number of variables is about 50: cycles of carbon, nitrogen, phosphorus, silicium are described, as well as production of chlorophyll-a by autotrophic plankton. Thermodynamical fields have been shown to be well reproduced by the model. The behaviour of chlorophyll and primary production also corresponds to the real pattern. The developed software complex Green JASMINE allows solving important problems concerning ecological systems of the White Sea. It is able to simulate the distribution of water temperature and salinity, ice cover, and ecological tracers depending on climate change scenarios. There is a functioning passive tracer advection block which can be useful for simulating ecological disasters. The complex is flexible and can be easily extended.

Key words: the White Sea; modeling; pelagic ecosystem; Green JASMINE; BFM.

Введение

В условиях изменчивости климата исследование морской флоры и фауны Севера является необходимым и неотъемлемым этапом в цепи мониторинговых работ, проводимых в Арктике и Субарктике. Эффективными инструментами изучения функционирования морских экосистем являются трехмерные математические модели. Они позволяют решать специфические задачи, которые даже при обычном многолетнем наблюдении либо затруднительны, либо невыполнимы. Это относится, например, к анализу сценариев изменения климата (потепление или похолодание, увеличение или уменьшение количества осадков, колебание характеристик расходов рек и т. п.), изменений концентрации биогенных элементов в отдельных районах водоема, а также к возможности прогнозирования состояния моря при сохранении наблюдающихся тенденций и при задаваемых нарушениях режима. При этом моделируется воздействие внешних факторов, а оцениваются термогидродинамические и экосистемные параметры в водоеме в зависимости от сценария.

Наличие подобной модели в ИПМИ КарНЦ РАН [Chernov, 2013] и объем репрезентативных данных по Белому морю за многолетний период,

имеющийся в ИВПС КарНЦ РАН [Толстикова и др., 2010] и ЗИН РАН [Usov et al., 2013; База...], создают предпосылки для ответа на вопрос, что происходит с экосистемами моря в теплый или холодный год, при усилении эвтрофикации, при поступлении с речным стоком загрязняющих веществ (нефтепродукты, пластик и др.). При условии выполнения адекватного воспроизведения моделью процессов, происходящих в водоеме, указанный путь работы со сценариями станет инструментом для создания прогноза изменений состояния Белого моря в будущем и для ретроспективного анализа. Обзор существующих моделей динамики Белого моря, включая экосистемы, был достаточно полно освещен в предыдущих работах [Белое море..., 2007; Толстикова, 2016], однако нам неизвестна другая подобная модель, учитывающая трехмерную гидродинамику, морской лед и экосистемы, поддерживаемая и развиваемая в настоящее время.

Совместное использование предлагаемой в статье модели, многолетних ихтиологических и биохимических данных о состоянии морских гидробионтов и экосистем в целом будет способствовать получению новых данных о влиянии изменений климата и экологических условий на формирование устойчивости уникальных для водоемов Арктического региона видов,

механизмов их приспособления к условиям высоких широт.

Материалы и методы

JASMINE – это программный комплекс численной модели водоема, воспроизводящей динамику и термодинамику вод и льда, созданный на базе модели Северного Ледовитого океана (FEMAO) проф. Н. Г. Яковлева [2009] и в соавторстве с ним [Чернов и др., 2016]. Структура JASMINE модульная, она относительно просто дополняется блоками усвоения данных динамики пелагической экосистемы, переноса примеси и т. п. Физические условия для расчетов (температура, соленость и плотность воды, освещенность, скорость ветра, размеры сеточной ячейки и т. п.) поставляет JASMINE, она же выполняет трехмерную адвекцию, диффузию и гравитационное осаждение трассеров. Термогидродинамические условия для Белого моря воспроизводятся адекватно [Чернов и др., 2016].

Блок экосистемы моря основан на модели BFM [<http://bfm-community.eu>], которая хорошо зарекомендовала себя для моделирования пелагической экосистемы морей и океанов (Атлантика, фьорды Норвегии, Средиземное море, Мировой океан) в составе комплексов PELAGOS, NEMO и других [Vichi et al., 2015; Lazzari et al., 2016].

BFM использует стехиометрический подход для математического описания состояния экологической системы: неизвестными в модели являются концентрации элементов и сложных веществ в составе различных функциональных групп, таких как диатомовые водоросли, крупный фитопланктон, цианобактерии, бактериопланктон, гетеротрофные жгутиконосцы, растворенное в воде вещество и т. п. Полный список переменных насчитывает пять десятков, при этом описаны циклы углерода, азота, фосфора, кремния, а также хлорофилла в составе автотрофных организмов, учитываются растворенный в воде кислород и сероводород. В модели также предусмотрен (хотя по умолчанию отключен) цикл железа. Поедание, например, одного вида фитопланктона хищным зоопланктоном описано как убывание концентраций веществ, входящих в состав первого, и рост таковых для второго. Всего в модели представлено по четыре группы фитопланктона (включая цианобактерии) и зоопланктона, одна группа пелагических неавтотрофных бактерий. Недостатком такого подхода является необходимость согласовывать значения полей на границах и в устьях рек.

Белое море представляет особую важность для Российской Федерации, поскольку

полностью входит в территориальные воды страны и активно используется для рыболовства и марикультуры [Белое море..., 2007]. Укажем его основные особенности, важные с точки зрения моделирования его экосистем.

Основная отличительная гидродинамическая особенность Белого моря – сильный полусуточный прилив, индуцированный из Баренцева моря и создающий характерную картину течений, при этом период приспособления близок к периоду прилива [Семенов, 2004]. Таким образом, имеет место квазипериодический режим течений и вихрей. Интенсивная приливная динамика вод приводит к их перемешиванию, особенно в северных районах моря – Воронке и Горле. Ветер также серьезно влияет на течения, особенно поверхностные, и способен сильно исказить создаваемую приливом структуру течений. Другая особенность моря – относительно большой объем речного стока (около 200 км³/год [Гидрометеорология..., 1991]), следствием чего является пониженная соленость и сравнительно обильное поступление биогенных элементов в заливы. Белое море можно рассматривать в качестве посредника между крупными реками и другими морями Арктического региона. Упомянутые выше приливные движения означают существенный водообмен между Белым и Баренцевым морями (вытекает около 2200 км³ воды в год, а втекает – 2000 км³ [Гидрометеорология..., 1991; Белое море..., 2007]). Имеет место баланс солености между затоком баренцевоморских вод, речным стоком и осадками. Высокая динамичность вод Белого моря снижает остроту «проблемы начальных данных», т. е. влияние начального распределения гидродинамических, термохалинных и биогеохимических полей быстро убывает со временем. Вместе с тем понятно, что сложно рассчитывать на точные измерения многочисленных величин во всем объеме моря.

Белое море относительно мелководно (средняя глубина 67 м), в силу чего рельеф дна существенно влияет на динамику течений; во многих районах биохимически активный (и даже эвфотический) слой простирается от поверхности до дна моря.

Разрабатываемый программный комплекс Green JASMINE, включающий блоки термогидродинамики и экосистемы, блок переноса примеси, функционирует на кластерах КарНЦ РАН [<http://cluster.krc.karelia.ru>] и ИВМ РАН [www.inm.ras.ru/cluster], поскольку алгоритм трехмерной адвекции требователен к вычислительным ресурсам и повышение числа переносимых скалярных полей до нескольких десятков ведет к необходимости использования

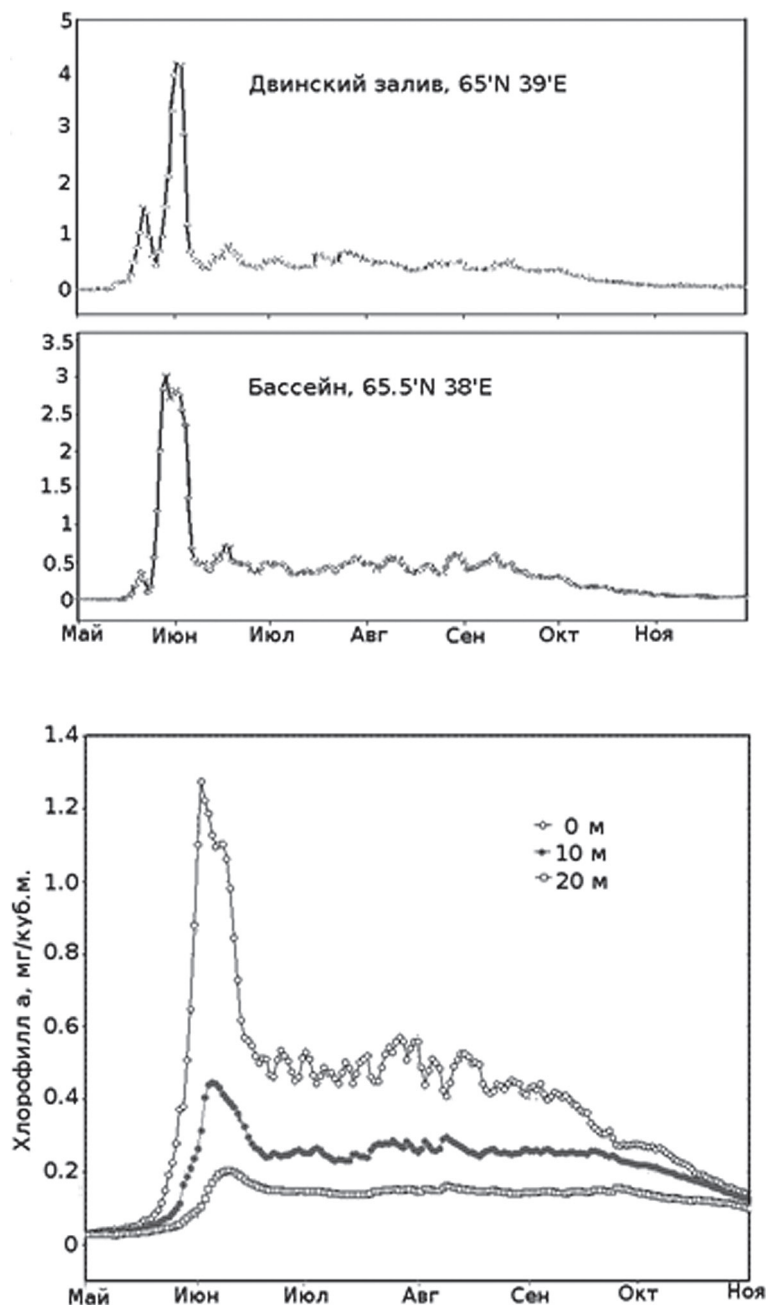


Рис. 1. Годовой ход хлорофилла *a* на поверхности Белого моря в двух точках: в Двинском заливе и в юго-восточной части Бассейна (вверху) и среднегодовое распределение по горизонтам. Среднесуточная концентрация (мг/м³)

в расчетах высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных устройств. По сравнению с современным персональным компьютером ускорение достигло 300 раз.

Результаты и обсуждение

В настоящий момент динамика первичных продуцентов воспроизводится адекватно. Распределение биогенных элементов несколько занижено, при этом соединения азота

воспроизводятся лучше, чем фосфаты. Однако в Двинском заливе концентрация нитратов выше наблюдаемых значений, тогда как в других районах ситуация обратная. Мы связываем это с нехваткой данных о фактическом потоке веществ со стоком рек. Тем не менее динамика хлорофилла, первичной продукции и биомассы фитопланктона качественно согласуется с общепринятой картиной. Отметим высокую изменчивость распределения хлорофилла *a*, как в пространстве, так и во времени. Узкий пик

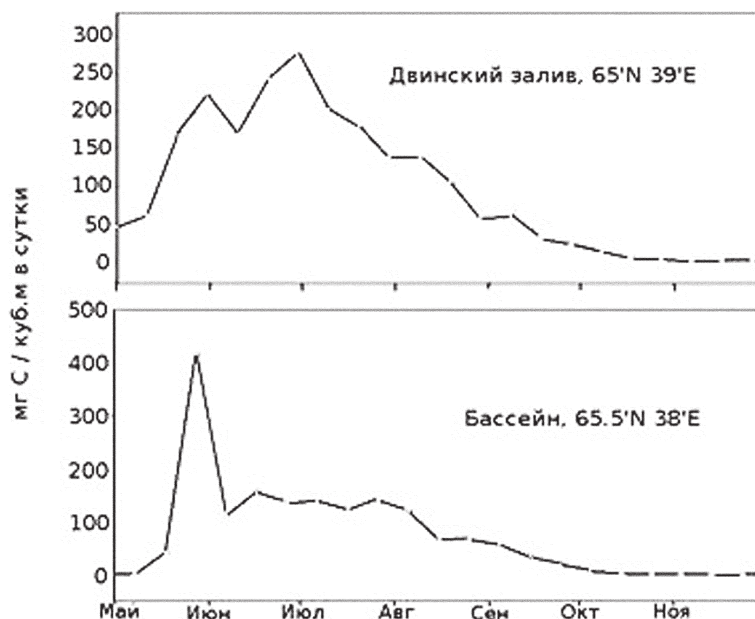


Рис. 2. Годовой ход первичной продукции на поверхности Белого моря в двух точках: в Двинском заливе и в юго-восточной части Бассейна. Опущены зимние месяцы. Осреднение за 10 суток (мг/м^3 в сутки)

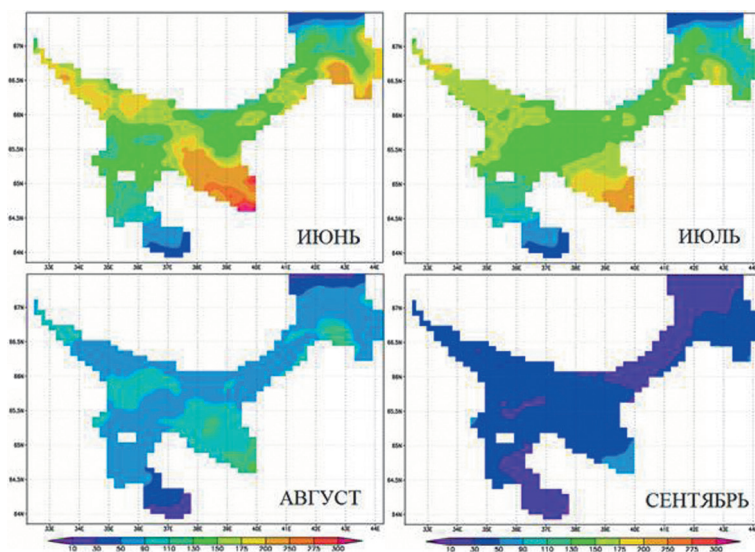


Рис. 3. Первичная продукция (июнь–сентябрь). Среднемесячные модельные данные (2004–2014 гг.), в $\text{мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$

концентрации хлорофилла, развивающийся в течение нескольких суток во время схода льда, полностью сглаживается при среднемесячном осреднении: если суточные значения достигают 4 мг/м^3 (такие значения действительно иногда наблюдаются [Kravchishina et al., 2015]), то среднемесячные не превосходят $0,8 \text{ мг/м}^3$. Эту особенность необходимо учитывать при моделировании распределения хлорофилла *a*.

На рисунке 1 приведены значения концентрации хлорофилла *a* на поверхности моря и по трем горизонтам по многолетним модельным

данным. Период времени, когда море покрыто льдом, опущен, так как в зимние месяцы концентрация близка к нулю, а объем данных по подледному пику цветения фитопланктона в марте–апреле пока не позволяет достоверно включить его в существующую модель.

Сравниваются две точки в Белом море (в Двинском заливе (65° с. ш., 39° в. д.) и в Бассейне (65.5° с. ш., 38° в. д.). В июне концентрация хлорофилла *a* понижается, что связано с ассимиляцией биогенных элементов фитопланктоном [Бергер, 2007]. В северных

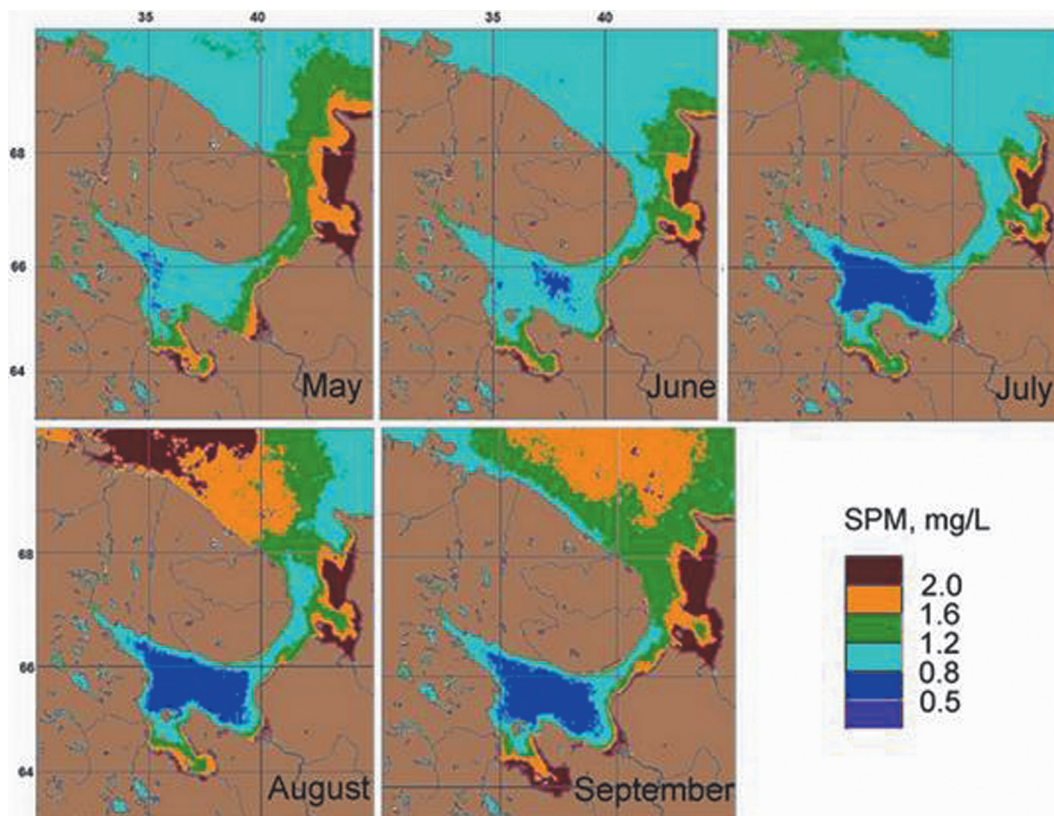


Рис. 4. Среднемесячные значения взвешенного твердого вещества (SPM), в мг/л. По данным спутника MODIS-Aqua. Май–сентябрь 2003–2010 гг. [Burenkov et al., 2011]

районах Белого моря (например, в Воронке) выражен осенний пик, связанный с обильным развитием динофлагеллят, обычным в этот период года [Berger et al., 2001; Martynova et al., 2011]. На нижних границах эвфотического слоя ход значительно более плавный в течение всего года (нижняя часть рис. 1).

На рисунке 2 показан годовой ход первичной продукции по модельным данным в тех же точках, что и для хлорофилла *a*.

Качественное модельное распределение хлорофилла *a* в Белом море в целом соответствует его реальному распределению [Бергер, 2007; Кравчишина, 2009; Ильяш и др., 2011, 2016; Kravchishina et al., 2015]. Так, активное развитие фитопланктона начинается во время разрушения и сразу после схода льда (в мае). Наибольшие концентрации в это время года наблюдаются в вершинах заливов, минимальные – в Горле и северной части Бассейна. Летом в Онежском заливе отмечаются низкие концентрации хлорофилла *a*, что связано с исчерпанием запасов биогенных элементов. Вертикальное распределение хорошо согласуется с данными измерений [Кравчишина, 2009; Kravchishina et al., 2015], и максимум наблюдается в фотической зоне, до горизонта 20 м. Сезонный модельный ход первичной продукции

соответствует диапазону измерений *in situ* [Бергер, 2007; Кравчишина, 2009; Ильяш и др., 2011, 2016; Максимова, 2012; Примаков, 2012]. Максимум продукции приходится на май, значительно менее выражены максимумы в августе и сентябре.

На рисунке 3 приведены средние многолетние модельные данные по первичной продукции Белого моря за период 2004–2014 гг.

Хорошо выражено снижение первичной продукции летом в Онежском заливе по сравнению с Двинским заливом. «Пятно» пониженной концентрации взвешенного твердого вещества на границе Кандалакшский залив – Бассейн в августе проявляется по данным спутниковых съемок практически для того же периода (рис. 4).

Заключение

Таким образом, разрабатываемый программный комплекс Green JASMINE помогает решать важные задачи, связанные с функционированием экосистем Белого моря. Его особенностью является возможность рассматривать распределение температуры и солености воды, льда и состояние экосистем в зависимости от сценариев изменения внешних факторов (метеорологические параметры, расходы

рек). Функционирует блок переноса примеси, включая перенос нефти, что особенно актуально при моделировании экологических катастроф. Кроме того, модель обладает значительной гибкостью и мощным потенциалом для расширения.

Результаты современных исследований пелагической экосистемы Белого моря [Usov et al., 2013; Белевич и др., 2015; Ильяш и др., 2016] внушают оптимизм, что в скором времени появятся репрезентативные данные по экосистемным параметрам и станет возможным адекватно воспроизводить распределение, например, пикофитопланктона, перенос криоводорослей со льдом, оценивать миграции личинок ихтиофауны или перемещение пятен нефти при ее разливах.

Предлагаемую модель рекомендуется планомерно использовать для проведения мониторинговых работ, которые могут иметь и определенный экономический эффект, так как их можно будет использовать в прогнозе изменения состояния рыб и беспозвоночных в водных экосистемах при климатических изменениях.

Работа по моделированию адвективного и диффузионного переноса скалярных полей, в том числе биогеохимических, и их гравитационного осаждения, а также работа по настройке взаимодействия гидродинамического и биогеохимического (BFM) блоков выполнена в ИВМ РАН и поддержана грантом РФФИ № 14-27-00126. Работа по разделу моделирования термогидродинамических и экосистемных параметров в «теплые» и «холодные» годы и установление биогеохимических закономерностей в зависимости от сценариев изменения климата выполняется при поддержке гранта РФФИ № 16-45-100162 p_a.

Литература

База данных ЗИН РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://www.st.nmfs.noaa.gov/copepod/time-series/ru-10101/> (дата обращения: 10.04.2016).

Белевич Т. А., Ильяш Л. В., Милютин И. А. и др. Метагеномика пиководорослей Белого моря: первые данные // Биохимия. 2015. Т. 80, № 11. С. 1731–1740.

Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н. Н. Филатова, А. Ю. Тержевика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.

Бергер В. Я. Продукционный потенциал Белого моря. Исследования фауны морей. СПб.: ЗИН РАН, 2007. Т. 60 (68). 292 с.

Вычислительный кластер Карельского научного центра РАН «Центр высокопроизводительной обра-

ботки данных». URL: <http://cluster.krc.karelia.ru> (дата обращения: 01.08.2016).

Вычислительный кластер Института вычислительной математики РАН: www.inm.ras.ru/cluster (дата обращения: 01.08.2016).

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. II. Вып. 2. Белое море. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биопродуктивности. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 196 с.

Данные реанализа NCEP/NCAR. URL: <http://www.esrl.noaa.gov> (дата обращения: 08.09.2016).

Ильяш Л. В., Радченко И. Г., Кузнецов Л. Л. и др. Пространственная вариабельность состава, обилия и продукционных характеристик фитопланктона Белого моря в конце лета // Океанология. 2011. Т. 51, № 1. С. 24–32.

Ильяш Л. В., Житина Л. С., Белевич Т. А. и др. Пространственное распределение фитопланктона Белого моря при нетипичном доминировании динофлагеллят (июль 2009 г.) // Океанология. 2016. Т. 56, № 3. С. 403–413. doi: 10.7868/S0030157416030096

Кравчишина М. Д. Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. М.: Научный мир, 2009. 264 с.

Максимова М. П. Эстуарная иерархическая система Белого моря. Препринт доклада. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 48 с.

Примаков И. М. Механизмы формирования пространственно-временной организации сообществ мезозoopланктона Белого моря // Исследование фауны морей. СПб.: ЗИН РАН, 2012. Т. 70 (78). 137 с.

Семенов Е. В. Численное моделирование динамики Белого моря и проблема мониторинга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2004. Т. 40, № 1. С. 128–141.

Толстиков А. В. Изменчивость температуры поверхностного слоя Белого моря. М.: ГЕОС, 2016. 212 с.

Толстиков А. В., Филатов Н. Н., Здоровеннов Р. Э. Белое море и его водосбор // Свид. о гос. рег. базы данных № 2010620435. 16 августа 2010 г.

Чернов И. А., Толстиков А. В. Программный комплекс JASMINE для моделирования динамики и экосистемы моря (на примере Белого моря) // Герценовские чтения. LXVIII конференция. СПб., 2015. С. 156–159.

Чернов И. А., Толстиков А. В., Яковлев Н. Г. Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда // Труды КарНЦ РАН. Серия Математическое моделирование и информационные технологии. 2016. № 8. С. 116–128. doi: 10.17076/mat397

Яковлев Н. Г. Воспроизведение крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Часть 1: Численная модель и среднее состояние // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2009. Т. 45, № 3. С. 1–16.

Berger V., Dahle S., Galaktionov K. et al. White Sea. Ecology and Environment. St. Petersburg; Tromsø. 2001. 157 p.

Biogeochemical FluxModel (BFM). URL: <http://bfm-community.eu> (дата обращения: 08.09.2016).

Burenkov V. I., Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Vazulya S. V. Space-time variability of suspended matter in the White Sea from satellite ocean color data // Current Problems in Optics of Natural Waters. Proceedings of the VI International conference. St. Petersburg: Nauka, 2011. P. 143–146.

Chernov I. Numerical Modelling of large-scale Dynamics of the White Sea // Universal Journal of Geoscience. 2013. Vol. 1 (3). P. 150–153.

Kravchishina M., Klyuvitkin A., Filippov A. et al. Suspended particulate matter in the White Sea: the results of long-term interdisciplinary research // Complex Interfaces Under Change: Sea – River – Groundwater – Lake. Proceedings of HP2/HP3, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, (Gothenburg, Sweden, July 2013). 2015. P. 35–41.

Lazzari P., Solidoro C., Salon S., Bolzon G. Spatial variability of phosphate and nitrate in the Mediterranean Sea: A modeling approach // Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers. 2016. 108. P. 39–52.

Martynova D. M., Kazus' N. A., Bathmann U. V. et al. Seasonal abundance and feeding patterns of copepods *Temoralongicornis*, *Centropageshamatusand* *Acartia* spp. in the White Sea (66°N) // Polar Biology, 2011. 34. P. 1175–1195. doi: 10.1007/s00300-011-0980-7

Usov N., Kutcheva I., Primakov I., Martynova D. Every species is good in its season: Shifts in annual temperature dynamics affect the zooplankton in the White Sea differently // Hydrobiologia. 2013. Special Issue. 706 (1). P. 11–33. doi: 10.1007/s10750-012-1435-z

Vichi M., Lovato T., Gutierrez Mlot E., McKiver W. Coupling BFM with Ocean models: the NEMO model (Nucleus for the European Modelling of the Ocean) // BFM Report series No. 2. Release 1.0 (August 2015. Bologna. Italy). 2015. 31 p.

Поступила в редакцию 03.10.2016

References

Baza dannih ZIN RAN [Database of Zoological Institute of RAS]. URL: <http://www.st.nmfs.noaa.gov/copepod/time-series/ru-10101/> (accessed: 10.04.2016).

Belevich T. A., Il'yash L. V., Milutina I. A., Logaceva M. D., Goryunov D. V., Troichkiy A. V. Metagenomika pikovodorosley Belogo morya: pervie danniya [Metagenomics of pico algae of the White Sea: the first data]. *Biohimiya* [Biochemistry]. 2015. Vol. 80, no. 11. P. 1731–1740.

Beloe more i ego vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov [The White Sea and its catchment under the influence of climate and anthropogenic factors]. Eds. N. N. Filatov, A. Yu. Terzhevik. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. 349 p.

Berger V. Ya. Produktivnyy potencial Belogo morya [Production potential of the White Sea]. Issledovaniya fauni morey [Explorations of the Fauna of the Seas]. St. Petersburg: ZIN RAS, 2007. Vol. 60 (68). 292 p.

Chernov I. A., Tolstikov A. V. Programmnyy kompleks JASMINE dlya modelirovaniya dinamiki i ekosistemy morya (na primere Belogo morya) [Software complex JASMINE for simulation of dynamics and ecosystem of a sea (on the example of the White Sea)]. Gercenovskie chteniya. LXVIII konferenciya [LXVIII Gertsens Readings. Proceed. of the Conference]. St. Petersburg, 2015. P. 156–159.

Chernov I. A., Tolstikov A. V., Iakovlev N. G. Kompleksnaya model' Belogo morya: gidrotermodynamika vod i morskogo l'da [Comprehensive model of the White Sea: hydrothermodynamics of water and sea ice]. *Trudy KarNC RAN* [Trans. of KarRC of RAS]. 2016. No. 8. P. 116–128. doi: 10.17076/mat397

Dannie reanaliza [Reanalysis data] NCEP/NCAR. URL: <http://www.esrl.noaa.gov> (accessed: 08.09.2016).

Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei SSSR. Vol. II. Beloe more. Iss. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas (USSR). Vol. II. The White Sea. Iss. 1. Hydrometeorological conditions]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 240 p.

Il'yash L. V., Radchenko I. G., Kuznecov L. L., Lisicina A. P., Martynova D. M., Novigatskiy A. N., Chul'cova A. L. Prostranstvennaya variabel'nost' sostava, obiliya i produktivnykh harakteristik fitoplanktona Belogo morya v konce leta [Spatial variability of species composition, abundance and productivity of phytoplankton in the White Sea at the end of summer]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2011. Vol. 51, no. 1. P. 24–32.

Il'yash L. V., Zhitina L. S., Belevich T. A., Shevchenko V. P., Kravchishina M. D., Pantyulin A. N., Tolstikov A. V., Chul'cova A. L. Prostranstvennoye raspredeleniye fitoplanktona Belogo morya pri netipichnom dominirovaniy dinoflagellyat (iyul' 2009 g.) [Spatial distribution of phytoplankton in the White Sea during atypical dinoflagellates domination (July 2009)]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2016. Vol. 56, no. 3. P. 403–413. doi: 10.7868/S0030157416030096

Kravchishina M. D. Vzveshennoye veshestvo Belogo morya i ego granulometricheskii sostav [Suspended substance in the White Sea and its grain size distribution]. Moscow: Naushniy mir, 2009. 264 p.

Maksimova M. P. Estuarnaya ierarhicheskaya sistema Belogo morya [Hierarchical estuarine system of the White Sea]. Preprint doklada [Preprint]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2012. 48 p.

Primakov I. M. Mehanizmi formirovaniya prostranstvenno-vremennoy organizatsii soobshestv mezozooplanktona Belogo morya [Formation mechanisms of spatio-temporal organization of mezozooplankton communities in the White Sea]. Issledovaniye fauny morey [Explorations of the Fauna of the Seas]. St. Petersburg: ZIN RAS, 2012. Vol. 70 (78). 137 p.

Semenov E. Chislennoe modelirovanie dinamiki Belogo morya i problema monitoringa [Numerical modelling of the White Sea dynamics and a problem of monitoring]. *Izvestiya RAN, FAO* [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]. 2004. No. 1. P. 128–141.

Tolstikov A. V. Izmenchivost' temperaturi poverhnostnogo sloya Belogo morya [Variability of the surface layer temperature of the White Sea]. Moscow: GEOS, 2016. 212 p.

Tolstikov A. V., Filatov N. N., Zdorovenov R. E. Be-
loe more i ego vodosbor. Svidetel'stvo ob oficial'noy reg-
istracii bazy danih [The official registration certificate
of the database *The White Sea and its catchment*].
No. 2010620435 ot 16.08.2010

Vichislitel'nyy klaster Karel'skogo nauchnogo
centra RAN [Computer cluster of KRC RAS]. Centr
visokoproizvoditel'noy obrabotki danih [Cen-
ter for high-performance data processing]. URL:
<http://cluster.krc.karelia.ru> (accessed: 01.08.2016).

Vichislitel'nyy klaster Instituta vichislitel'noy matema-
tiki RAN [Computer cluster of Numerical Mathematics].
URL: www.inm.ras.ru/claster (accessed: 01.08.2016).

Yakovlev N. G. Vosproizvedeniye krupnomasshtab-
nogo sostoyaniya vod i morskogo l'da Severnogo Ledo-
vitogo okeana v 1948–2002 gg. Chast' 1: Chislennaya
model' i srednee sostoyanie [Reproduction of the large-
scale state of water and sea ice in the Arctic Ocean from
1948 to 2002. Pt. 1. Numerical model and the average
state]. *Izvestiya RAN, FAO [Izvestiya, Atmospheric and
Oceanic Physics]*. 2009. No. 3. P. 1–16.

Berger V., Dahle S., Galaktionov K., Kosoboko-
va X., Naumov A., Rat'kova T., Savinov V., Savinova T.
White Sea. Ecology and Environment. St. Petersburg;
Tromsø. 2001. 157 p.

Biogeochemical Flux Model (BFM). URL:
<http://bfm-community.eu> (accessed: 08.09.2016).

Burenkov V. I., Kopelevich O. V., Sheberstov S. V.,
Vazulya S. V. Space-time variability of suspended mat-
ter in the White Sea from satellite ocean color data. Cur-
rent Problems in Optics of Natural Waters. Proceedings
of the VI International conference. St. Petersburg: Nau-
ka, 2011. P. 143–146.

Chernov I. Numerical Modelling of large-scale Dyna-
mics of the White Sea. *Universal Journal of Geoscience*.
2013. Vol. 1 (3). P. 150–153.

Kravchishina M., Klyuvitkin A., Filippov A., Novi-
gatsky A., Politova N., Shevchenko V., Lisitzin A. Sus-
pended particulate matter in the White Sea: the results
of long-term interdisciplinary research. Complex Inter-
faces Under Change: Sea – River – Groundwater – Lake.
Proceedings of HP2/HP3, IAHS-IAPSO-IASPEI Assem-
bly (Gothenburg, Sweden, July 2013). 2015. P. 35–41.

Lazzari P., Solidoro C., Salon S., Bolzon G. Spatial
variability of phosphate and nitrate in the Mediterranean
Sea: A modeling approach. *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2016. 108. P. 39–52.

Martynova D. M., Kazus' N. A., Bathmann U. V.,
Graeve M., Sukhotin A. A. Seasonal abundance and
feeding patterns of copepods *Temoralongicornis*,
Centropageshamatus and *Acartia* spp. in the White
Sea (66°N). *Polar Biology*. 2011. 34. P. 1175–1195. doi:
10.1007/s00300-011-0980-7

Usov N., Kutcheva I., Primakov I., Martynova D. Ev-
ery species is good in its season: Shifts in annual tem-
perature dynamics affect the zooplankton in the White
Sea differently. *Hydrobiologia*. 2013. Special Issue. 706
(1). P. 11–33. doi: 10.1007/s10750-012-1435-z

Vichi M., Lovato T., Gutierrez Mlot E., McKiver W.
Coupling BFM with Ocean models: the NEMO model
(Nucleus for the European Modelling of the Ocean).
BFM Report series No. 2. Release 1.0 (August 2015. Bo-
logna. Italy). 2015. 31 p.

Received October 03, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Толстик Алексей Владимирович

старший научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного
центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: alexeytolstikov@mail.ru
тел.: (8142) 576381

Чернов Илья Александрович

старший научный сотрудник, к. ф.-м. н.
Институт прикладных математических исследований
Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: iachernov@yandex.ru
тел.: (8142) 766312

Мурзина Светлана Александровна

заведующая лаб. экологической биохимии, к. б. н.
Институт биологии Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: murzina.svetlana@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Tolstikov, Alexey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: alexeytolstikov@mail.ru
tel.: (8142) 576381

Chernov, Ilya

Institute of Applied Mathematical Research,
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: iachernov@yandex.ru
tel.: (8142) 766312

Murzina, Svetlana

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: murzina.svetlana@gmail.com

Мартынова Дарья Михайловна

старший научный сотрудник, к. б. н.
Зоологический институт РАН
Университетская наб., 1, Санкт-Петербург, Россия, 199034
эл. почта: daria.martynova@gmail.com
тел.: (812) 3280311

Яковлев Николай Геннадьевич

ведущий научный сотрудник, д. ф.-м. н.
Институт вычислительной математики РАН
ул. Губкина, 8, Москва, Россия, 119333
эл. почта: nick_yakovlev@mail.ru
тел.: (495) 9848120

Martynova, Daria

Zoological Institute, Russian Academy of Sciences
1 Universitetskaya Nab., 199034 St. Petersburg, Russia
e-mail: daria.martynova@gmail.com
tel.: (812) 3280311

Yakovlev, Nikolai

Institute of Numerical Mathematics,
Russian Academy of Sciences
8 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia
e-mail: nick_yakovlev@mail.ru
tel.: (495) 9848120