

УДК 556.114:551.583:556.072 (268.46)

ИЗМЕНЧИВОСТЬ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В БЕЛОМ МОРЕ ДЛЯ РАЗНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. В. Толстиков¹, И. А. Чернов²

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

² Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

Изменчивость биогеохимических процессов Белого моря при разных климатических условиях исследовалась посредством численных экспериментов. Отобранные модельные годы условно разделены на теплые, холодные и средние (климатические) согласно методике, предложенной авторами ранее. Для численного моделирования применен программный комплекс JASMINE, основанный на модели термогидродинамики Северного Ледовитого океана FEMAO и содержащий модель пелагической экосистемы BFM. Комплекс предназначен для совместного моделирования термогидродинамических и биогеохимических процессов в море. Подробно рассмотрены модельные годы: теплый 2013-й и холодный 1994-й. Изучена динамика температуры поверхностного слоя и толщи воды Белого моря в эти годы, распределение хлорофилла *a* и первичной продукции. Получены закономерности и проанализированы причины наблюдающихся зависимостей в условно теплый и условно холодный год. На проявление в биогеохимических процессах Белого моря теплых, холодных и средних лет влияют макроциркуляционные процессы атмосферы, одним из которых является Северо-Атлантическое колебание, или NAO (North Atlantic Oscillation). События NAO (положительные и отрицательные) соответствуют положительным и отрицательным периодам в температуре поверхностного слоя Белого моря. NAO характеризуется разностью давления между Исландским минимумом и Азорским максимумом, а это в свою очередь сказывается на усилении или ослаблении западного переноса в Северном полушарии, перераспределении тепла и влаги. В результате численных экспериментов выделен ключевой период года, приходящийся на май. В этот месяц отмечается интенсификация процессов в пелагической экосистеме Белого моря независимо от его принадлежности к теплому или холодному году. Выявлена связь событий мая с дальнейшим развитием биогеохимических процессов в течение лета.

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

A. V. Tolstikov, I. A. Chernov. VARIABILITY OF BIOGEOCHEMICAL PROCESSES IN THE WHITE SEA UNDER DIFFERENT CLIMATIC CONDITIONS: THE MODELING APPROACH

The JASMINE numerical complex based on the FEMAO model of the Arctic Ocean and the BFM pelagic ecosystem model is used for integrated modeling of hydrody-

namic, thermodynamic, and biogeochemical processes in the White Sea. The variation of the White Sea ecosystems under different climatic conditions, i. e., a warm, cold, and an average (close to multiannual average) year, is studied by numerical experiments. Several years are considered in detail: the warm 2013 and the cold 1994, including the surface layer and the water column temperature, the distribution of chlorophyll *a*, primary production. We reveal some regularities and explain the observed dependencies in the warm and the cold year. The phenomenon of warm, cold, and average years in the biogeochemical processes in the White Sea is influenced by global oscillations in the atmosphere, mainly the North Atlantic Oscillation (NAO). The events of the North Atlantic oscillation (both positive and negative) correspond to positive and negative deviations of the surface layer temperature of the White Sea. NAO is generated by the pressure difference between the Icelandic minimum and the Azores maximum, which, in turn, amplifies the Western transport in the Northern hemisphere, redistribution of heat and moisture. According to the numerical experiments, the key period of the year for the pelagic ecosystem dynamics is May. It is shown to be tightly connected to the later biogeochemical processes during the summer.

Keywords: White Sea; pelagic ecosystem; biogeochemistry; modeling; JASMINE; BFM.

Введение

Исследование экосистем Белого моря с помощью сложных комплексных математических моделей диктуется необходимостью согласованного описания термогидродинамических и биогеохимических процессов этого водоема. Актуально знать ключевые события года и закономерности гидрологических характеристик Белого моря под воздействием климатических изменений и реакцию его экосистем на потепление и похолодание, изменчивость ледового режима, антропогенное воздействие.

Моделирование позволяет ставить эксперименты, которые затруднительно или невозможно провести в природных условиях. Так, можно изучить реакцию процессов в Белом море без прилива или в полностью безветренный год, что важно для определения вклада каждого фактора. Аналогично есть возможность изменить облачность, объем речного стока, температуру воздуха и воды, прозрачность льда, поток солнечной радиации для рассмотрения сценарных ситуаций. Помимо естественных факторов можно оценить антропогенное воздействие, например динамику переноса загрязнителей различного генезиса (нефтяные пятна, пластик и т. п.).

Морские пелагические сообщества живых организмов относительно быстро реагируют на внешние воздействия. Эти организмы имеют короткий жизненный цикл по сравнению, например, с донными сообществами, поэтому отклик пелагической экосистемы на внешний фактор, как правило, быстрее и ярче выражен. Ключевым событием в сезонном цикле изменений пелагических сообществ Белого моря

является наступление весны: сход льда, резкое увеличение поступления солнечной радиации, половодье на реках водосбора, поступление биогенных элементов и т. д. Зная отклик экосистем на воздействующие факторы, можно рассчитать сценарий дальнейшего развития процесса.

Для понимания механизма термогидродинамических и биогеохимических закономерностей в морской системе и взаимного влияния факторов незаменимы комплексные трехмерные численные модели, адекватно отражающие динамику процессов. В сочетании с прямыми и дистанционными измерениями различных параметров в водоеме результаты моделирования вносят заметный вклад в интерпретацию взаимосвязи событий и сценариев их развития.

Для Белого моря в настоящий момент, насколько нам известно, функционирует только один такой программный комплекс – JASMINE [Chernov et al., 2018], включающий в себя модель экосистемы моря BFM [<http://bfm-community.eu>].

Материалы и методы

Численное воспроизведение динамики состояния моря как комплексной системы вод, льда и экосистем требует использования достаточно производительных вычислительных средств, современных алгоритмов и адекватного математического описания. Обзор существующих моделей динамики Белого моря, включая экосистемы, был достаточно полно освещен в предыдущих работах [Белое..., 2007; Толстикова, 2016]. Мы развиваем, применительно к Белому морю, программный ком-

плекс JASMINE [Чернов и др., 2016; Толстикова и др., 2017; Chernov et al., 2018]. Он создан на базе модели Северного Ледовитого океана (FEMAO) Н. Г. Яковлева [2009] и в соавторстве с ним. Программный комплекс позволяет рассчитывать динамику течений и термохалинных полей, характеристики морского льда (количество и сплоченность льда разной толщины, а также количество снега на нем), уровень моря. Возможно воспроизведение переноса примесей произвольной природы. В качестве экосистемного блока для Белого моря выбрана модель BFM (<http://bfm-community.eu>), пригодная для водоемов разных масштабов (от региональных морей до Мирового океана), разных климатических условий [Vichi et al., 2015a; Lazzagari et al., 2016] и внедренная, например, в программный комплекс NEMO [Vichi et al., 2015b]. Модель BFM описывает потоки вещества между различными группами (автотрофных и гетеротрофных организмов, бактерий, фракций взвешенного органического вещества, растворенного неорганического вещества) в силу многочисленных биохимических процессов (питание, фотосинтез, разложение вещества и т. п.). Учитывается гравитационное осаждение ряда компонент экосистемы (в частности, детрита) и обмен вещества с донными отложениями, играющими важную роль в относительно мелководном Белом море.

Результаты и обсуждение

Рассмотрен период с 1975 по 2014 г., по продолжительности превышающий климатическую норму 1981–2010 гг. [Коршунова, Швець, 2014]. В нем выбирались характерные модельные годы на базе нашей методики [Толстикова, 2016, §2.2], основанной на анализе среднегодовых значений температуры воды. Годы делятся на теплые, холодные и средние (климатические) по температуре T , осредненной по объему моря либо по поверхностному слою. Ряд наблюдений составляет три неравные части в зависимости от средних и экстремальных значений. Граница температур для холодных лет зависит от разности между средней и минимумом, аналогично для теплых лет: между средней и максимумом. Каждый год периода с 1975 по 2014 г. классифицирован как теплый, холодный или средний на основе рассчитанной в модели средней по объему температуры воды Белого моря (табл.). Значения ниже 1,52 °C (1,10–1,52) относят год к холодным, выше 2,32 °C (2,32–2,68) – к теплым, а между 1,53 и 2,31 °C – к средним (климатическим). Аналогична классификация по модель-

ной средней температуре поверхностного слоя воды: ниже 3,11 °C (2,74–3,11) – холодный год, выше 3,96 °C (3,96–4,42) – теплый, между 3,12 и 3,95 °C – средний. Помимо температуры получены другие среднемесячные термогидродинамические и биогеохимические поля для характерных лет, с добавлением одного предыдущего и одного последующего года.

В качестве теплого взят 2013 г., так как среднегодовая модельная температура толщи воды и поверхностного слоя Белого моря за этот год составила соответственно 2,68 и 4,42 °C. Модельные среднемесячные значения получены для периода 2012–2014 гг. Холодный год – 1994 (1,10 °C – температура толщи; 3,03 °C – поверхности), период моделирования – 1993–1995 гг. Средний год – 2003 (1,73 °C – температура толщи; 2,95 °C – поверхности), период моделирования – 2002–2004 гг.

Средних лет значительно больше, поэтому особый интерес представляют именно отклонения, то есть теплые и холодные годы.

В таблице представлены только теплые и холодные годы за период 1975–2014 гг. Не все теплые или холодные годы по температуре поверхностного слоя совпадают с такими же по температуре толщи воды. Это связано с перераспределением тепла в течение года в море, что не происходит мгновенно; также играют роль допущения представленной методики [Толстикова, 2016]. Отметим, что по результатам моделирования в 2010–2014 гг. и по толще, и по поверхности моря объективно все годы теплые, а значения температуры воды во всем ряду 1975–2014 гг. максимальные. Таким образом, по модельным данным наблюдается потепление в районе Белого моря.

Модельные теплые, холодные и средние годы хорошо согласуются с результатами измерений, содержащимися в базе данных ИВПС КарНЦ РАН [Толстикова и др., 2010], собранной по результатам многолетних экспедиций. Так, измерения температуры в Онежском, Кандалакшском и Двинском заливе, а также Бассейне за период 2001–2018 гг., выполненные в основном в теплое время года, и качественно, и количественно отражают тенденции изменчивости, отмеченные при анализе модельных данных. Это относится к положению фронтальных зон, прогреву заливов в теплые годы, более позднему цветению фитопланктона в холодные годы. Важной особенностью является то, что за последнее десятилетие отмечается увеличение температуры поверхностного слоя в заливах Белого моря. Это косвенно свидетельствует о наблюдающемся потеплении климата в районе Белого моря и по данным измерений.

Характерные годы по модельной температуре поверхностного слоя и водной толщи Белого моря (Т °С) для периода 1975–2014 гг.

Typical years of the model temperature of the surface layer and the water column of the White Sea (Т °С) for 1975–2014

Поверхностный слой Surface layer				Толща воды Water column			
Теплые Warm		Холодные Cold		Теплые Warm		Холодные Cold	
Год Year	Т	Год Year	Т	Год Year	Т	Год Year	Т
1989	4,34	1976	3,04	1975	2,33	1976	1,30
2000	4,17	1978	2,74	2000	2,48	1978	1,49
2005	4,09	1985	2,95	2009	2,55	1987	1,47
2011	4,40	1993	2,91	2010	2,63	1993	1,32
2012	4,00	1994	3,03	2011	2,63	1994	1,10
2013	4,42	1999	2,42	2012	2,49	1997	1,37
2014	4,00	2002	2,65	2013	2,68		
		2003	2,95	2014	2,61		

В мае интенсифицируются процессы в экосистемах Белого моря. После схода льда и увеличения продолжительности светового дня отмечается начало вегетации фитопланктона [Бергер, 2007].

Рассмотрим модельный холодный 1994 г. начиная с мая. В мае 1994 г. температура поверхностного слоя низкая, колеблется в районе 0 °С, лишь в вершинах Двинского и Онежского залива начинается потепление, связанное со сходом льда и начавшимся прогревом за счет воздействия солнечной радиации. В июне температура на большей части моря около 3–4 °С, в устьях рек Онега и Северная Двина идет активный прогрев. Температура июля не соответствует средним многолетним значениям для центральной части моря (11–12 °С), она существенно ниже (6 °С), лишь в Онежском заливе 13 °С. В августе происходит нагрев до среднемноголетних значений лишь в Онежском заливе, в Бассейне – 9 °С. В то же время на большей части водоема температура около 10 °С. В холодный год температура поверхностного слоя относительно высокая в осенние месяцы, лишь более быстро остывают заливы. Так, сентябрь и октябрь слабо различаются по этому показателю. В ноябре на большей части Белого моря температура поверхностного слоя около 4 °С, в заливах начинается замерзание. В декабре на большей части моря температура чуть ниже 0 °С.

Рассмотрим модельный теплый 2013 г. Уже в мае температура поверхностного слоя для акватории, прилегающей к Поморскому берегу, составляет 5–7 °С и практически для всей акватории Белого моря значения температуры положительные, за исключением Горла, Воронки и северной части Кандалакшского залива. В июне прогрев уже явно проявляется

на всей акватории, до 12 °С в Онежском заливе и 6 °С в Бассейне. В июле температура центральной части достигает 13 °С, а в Онежском заливе – 17 °С. В августе прогрев охватывает весь Бассейн (13–14 °С). В сентябре 2013 г. температура поверхностного слоя значительно выше (10–12 °С) по сравнению с тем же месяцем 1994 г. (около 9 °С). В октябре 2013 г. температура еще достаточно высокая, для большей части акватории выше 5 °С, но в устьях рек отмечается понижение до 2 °С. В ноябре также запас тепла значителен, температура в Бассейне выше 2 °С, в Онежском заливе температура отрицательная. В декабре в Бассейне присутствует пятно воды с положительными значениями температуры, но на большей части акватории температура ниже 0 °С.

В августе 2013 г. в Белом море была проведена комплексная экспедиция ИО РАН и ИВПС КарНЦ РАН. Измерения показали, что для данного времени года характерно классическое летнее распределение температуры Белого моря. Количественные показатели были выше, чем в 2012 г. Это касается и поверхностного, и придонного горизонтов [Политова и др., 2014]. Модельные данные за август 2013 г. согласуются с данными измерений.

Для модельного среднего 2003 г. характерны следующие особенности. В мае в северной части Белого моря температура колеблется в районе 0 °С, в южной части – 2–4 °С. В июне Онежский залив прогревается до 11 °С, севернее Соловецких островов на большей части акватории – около 5 °С, вдоль Карельского берега – 8–9 °С. В июле наблюдается очень мозаичная картина: Онежский залив – от 18 °С в устье до 13 °С южнее Соловецких о-вов, Кандалакшский залив – 13–15 °С, Двинский залив – 10 °С, Бассейн – от 5 до 10 °С. В Гор-

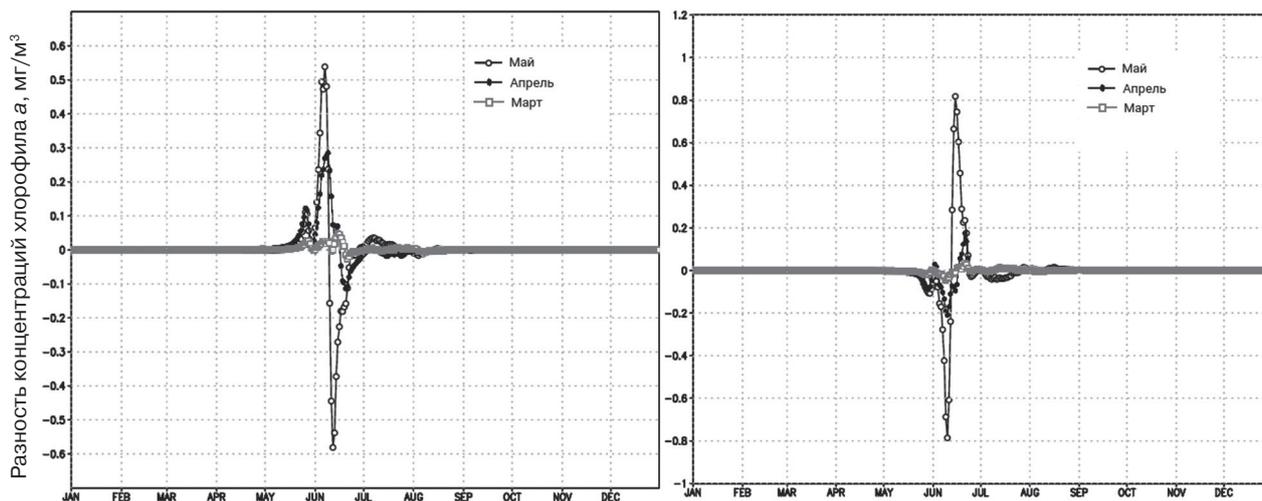


Рис. 1. Разница между осредненной по поверхности моря среднесуточной концентрацией хлорофилла *a* для теплого (слева) и холодного (справа) года

Fig 1. The difference between the surface- and daily average concentration of chlorophyll *a* for the warm (left) and cold (right) years

ле 2–4 °С. В Мезенском заливе около 0 °С. Распределения августа похожи на июльские, а в сентябре – около 9 °С на всей акватории моря. В октябре практически по всему морю температура составляет 2–4 °С, в Горле около 5 °С. В ноябре температура поверхностного слоя 0–2 °С, в Онежском заливе отрицательные значения. В декабре отрицательные значения температуры наблюдаются практически на всей акватории Белого моря.

Результаты исследования модельных данных свидетельствуют о решающем влиянии распределения майской температуры на последующее ее распределение в летние и осенние месяцы. Так, высокие значения температуры поверхностного слоя в мае сохраняются в течение всего лета и начала осени, а текущий год характеризуется значительным теплозапасом. Естественно, штормовые явления достаточно быстро разрушают установившуюся картину температурных полей, однако не могут в целом изменить среднемесячных показателей температуры.

Оценить влияние температуры воздуха на состояние моря позволяет численный эксперимент (рис. 1). Были смоделированы теплый и холодный месяцы: температура воздуха в течение месяца (март, апрель, май) одного года увеличена/уменьшена на 2 °С, а облачность уменьшена/увеличена на 20 % (использовались данные реанализа NCEP (<http://www.esrl.noaa.gov>)). В оставшиеся месяцы года температура не модифицировалась. Оценивались вариации всех переменных модели за этот измененный год. На рис. 1 пред-

ставлены графики отклика концентрации хлорофилла *a* в теплый период года на модифицированную температуру различных месяцев.

Результаты эксперимента показывают, что наиболее заметный отклик биогеохимических параметров стимулируется изменениями майской температуры (как при потеплении, так и при похолодании). Данные [Зимин, 2016] свидетельствуют, что именно в мае миграция фронтальных зон в Белом море достигает максимальных значений (в Двинском заливе до 70 км), а это в свою очередь ведет к быстрым перестройкам в морских экосистемах. Существенно, что график различия (рис. 1) имеет два пика: более ранней вспышке хлорофилла *a* соответствует и более раннее падение концентрации в июне, связанное со снижением биогенных элементов. Влияние майских изменений прослеживается практически до сентября включительно.

Рассмотрение модельных распределений по декадам (10 суток) свидетельствует, что ключевым периодом года, в котором закладывается характерная годовая динамика беломорских экосистем, вероятно, является период с 20 мая по 10 июня. Для проверки этой гипотезы требуется проведение дополнительных расчетов с привлечением большего количества измеренных значений температуры воды Белого моря и концентрации хлорофилла *a*.

Особенности температурного режима отражаются на внутригодовом распределении фитопланктона. Были проведены модельные расчеты по распределению хлорофилла *a* и первичной продукции. На рис. 2 показано

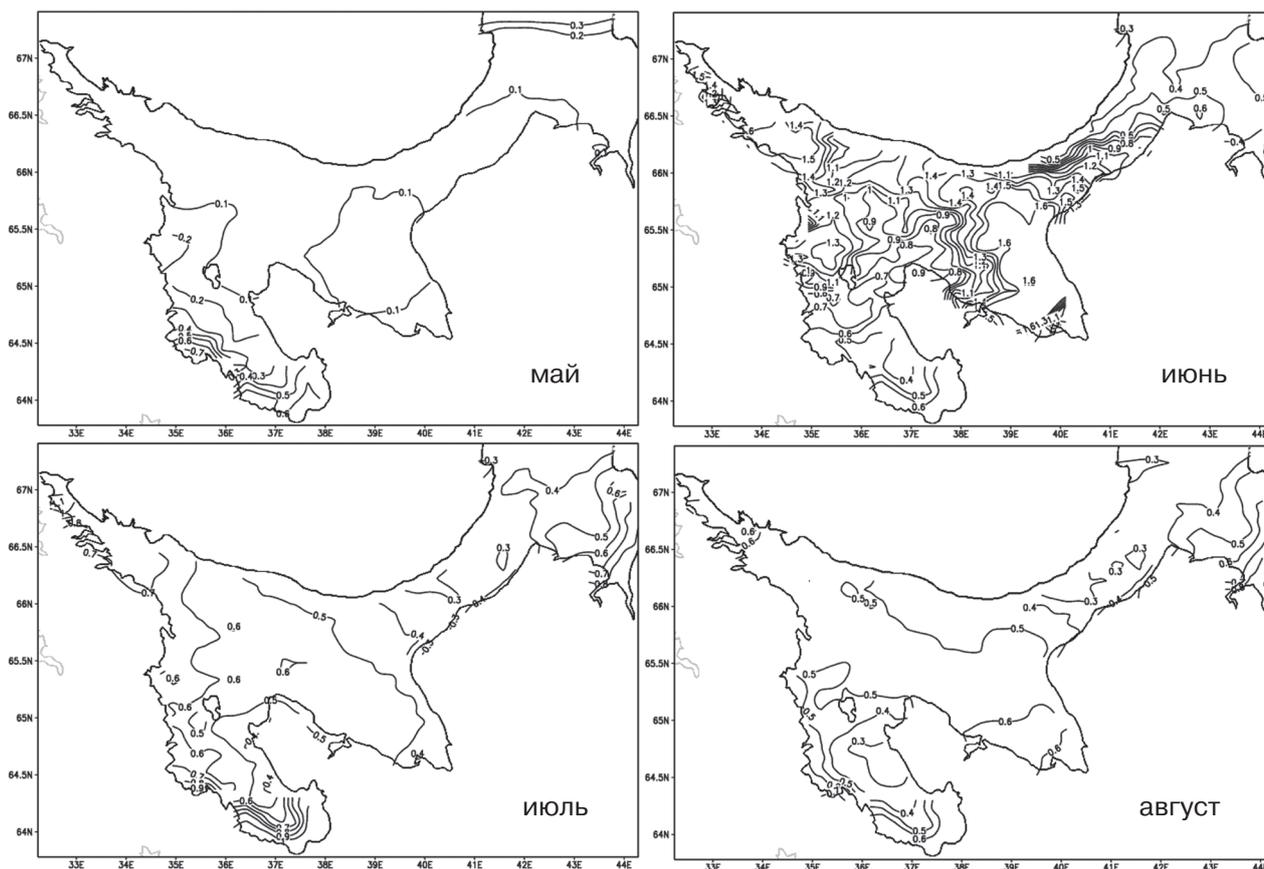


Рис. 2. Распределение модельного хлорофилла *a* в холодном 1994 г., в mg/m^3 . Поверхностный слой
 Fig 2. The distribution of model chlorophyll *a* concentration in the cold 1994, mg/m^3 . The surface layer

распределение хлорофилла *a* в поверхностном слое в холодном 1994 г., на рис. 3 – в теплом 2013 г.

При сравнении рис. 2 и 3 хорошо заметно, что наиболее быстрые изменения происходят от мая к июню. В это время сходит лед в Белом море, начинается прогрев поверхностного слоя, усиливается сток рек, приносящих пресную воду и биогенные элементы с водосбора. В период половодья проходит 60–80 % объема всего годового стока рек, впадающих в Белое море, на май при этом приходится 40 % годового стока для р. Северная Двина [Ресурсы..., 1972]. Естественно, что за этот месяц происходят глобальные изменения в экосистемах Белого моря в сезонном аспекте.

Видно (рис. 4), что май 1993 и 1994 года различается и по температуре, и по распределению хлорофилла *a*, аналогично и 2012 и 2013 гг. Отметим, что распределения апреля для этих лет и по температуре, и по хлорофиллу не содержат явных различий. События лета, таким образом, формируются в мае и прослеживаются до ранней осени. После зимы события предыдущего года как бы «забываются» системой, и после схода льда в Белом море

начинается новый цикл, скорость развития которого снова определяется процессами, происходящими в мае. Естественно, это видимая часть биогеохимических процессов, имеющая непосредственное отношение к однолетним организмам, хотя резонно предположить, что и для многолетних организмов события мая значимы.

При моделировании первичной продукции отмечаются следующие особенности. Весной максимум выражен в приустьевых участках моря – с повышенным содержанием биогенных элементов и относительно высокой температурой воды. Летом первичная продукция снижается, что связано с истощением запаса биогенных элементов [Бергер, 2007], например, это хорошо заметно в Онежском заливе. Осенью максимум относительно всей акватории наблюдается в Бассейне.

В теплый год количество продукции выше, и наиболее ярко это проявляется начиная с июня. В мае различия выражены еще не так сильно. Однако уже в июле распределение для холодного и теплого года снова становится похожим. В теплый год лишь в южной части Белого моря (особенно в Двинском заливе) продук-

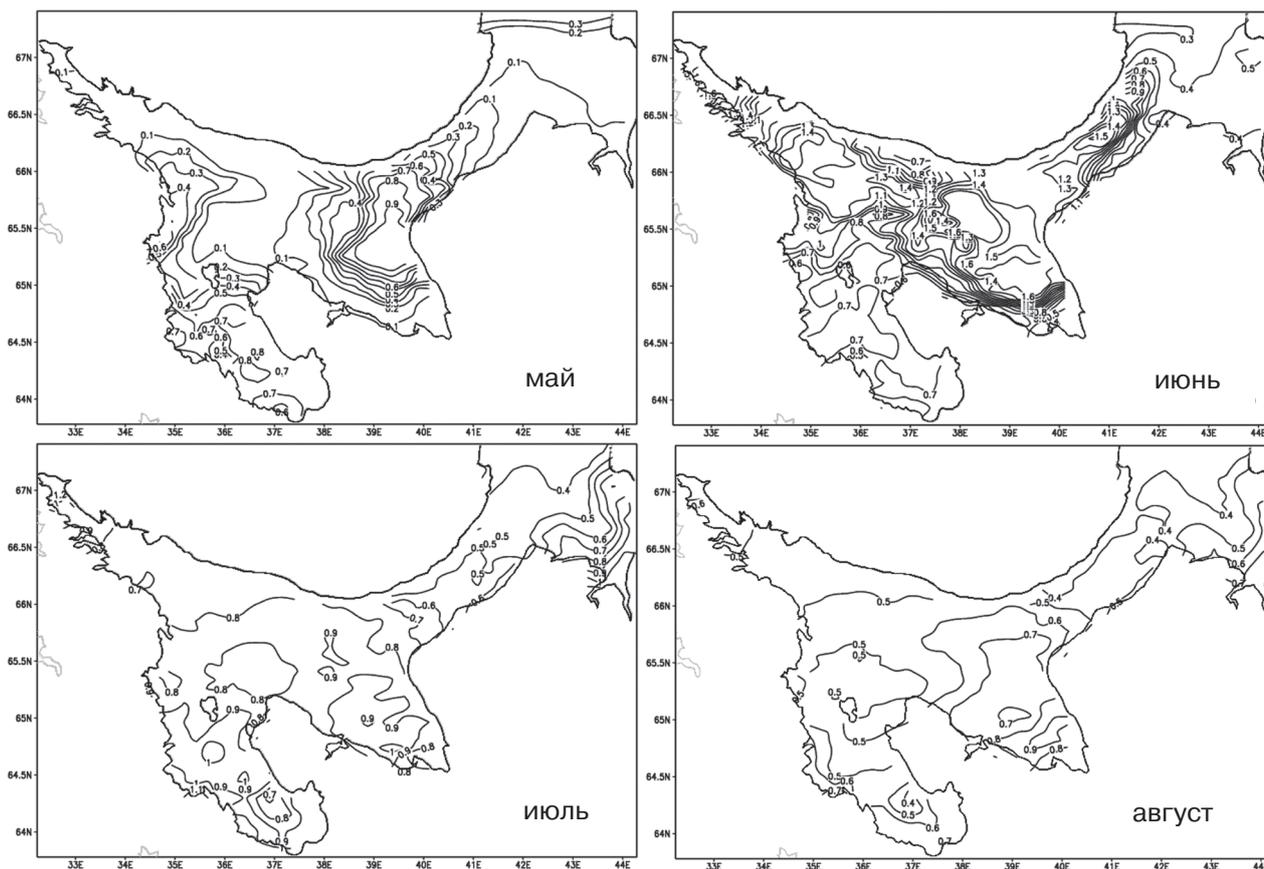


Рис. 3. Распределение модельного хлорофилла *a* в теплом 2013 г., в mg/m^3 . Поверхностный слой
 Fig 3. The distribution of model chlorophyll *a* concentration in the warm 2013, mg/m^3 . The surface layer

ция выше. Наиболее продуктивными являются заливы Белого моря, что хорошо согласуется с литературными данными [Бергер, 2007; Белое..., 2007].

Заключение

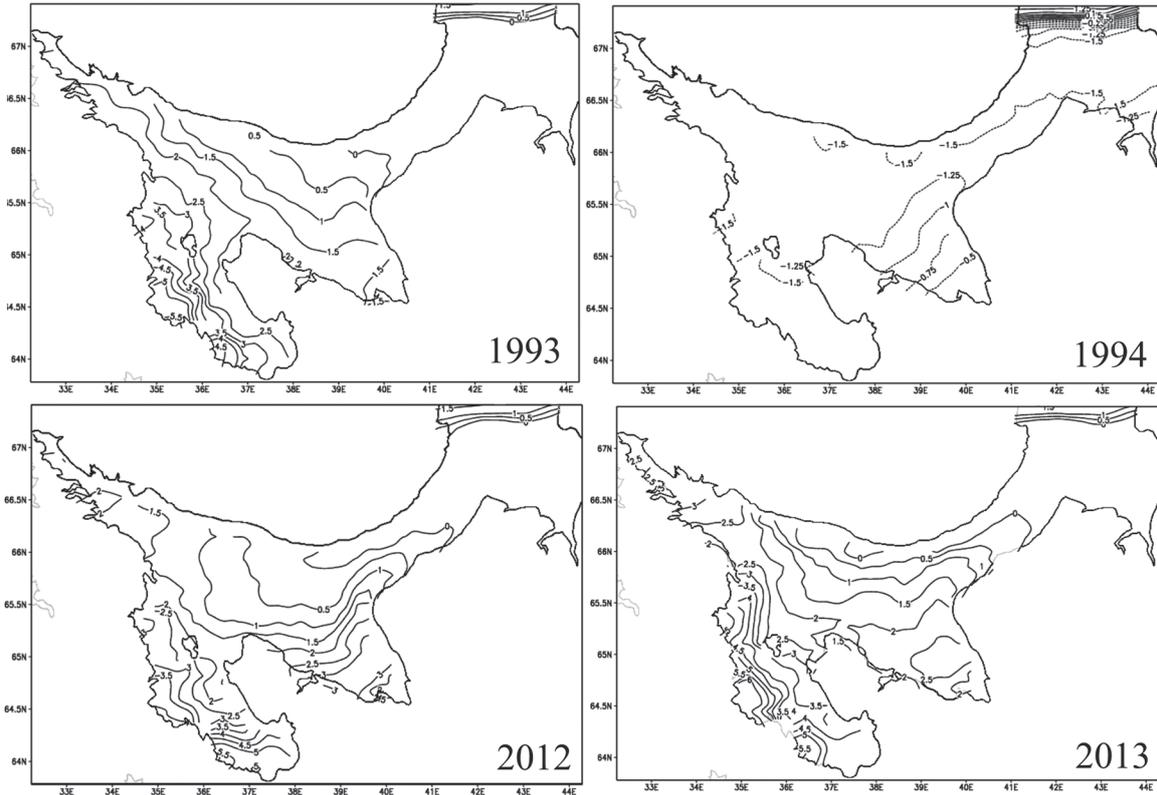
Возможности программного комплекса JAS-MINE и объем репрезентативных данных по Белому морю за многолетний период [Толстиков и др., 2010; Usov et al., 2013; База...] помогают ответить на вопрос, что происходит с экосистемами моря в теплый, холодный или средний год, как изменяются сроки цветения фитопланктона, первичная продукция.

На проявление теплых, холодных и средних лет в биогеохимических процессах Белого моря влияют макроциркуляционные процессы, одним из которых является Северо-Атлантическое колебание, или NAO (North Atlantic Oscillation) [Серяков, 1979; Смирнов и др., 1998]. NAO характеризуется разностью давления между Исландским минимумом и Азорским максимумом, а это в свою очередь влияет на интенсификацию западного переноса и перераспределение тепла и влаги в Северном полушарии

[Смирнова и др., 2001; Мирвис и др., 2009; Астафьева, Раев, 2010]. Различные события NAO (положительные и отрицательные) соответствуют положительным и отрицательным периодам в температуре поверхностного слоя Белого моря. Например, в индексах NAO и температуре поверхностного слоя Белого моря синхронно прослеживаются теплый 1989 г. и холодный 1978 г. [Толстиков, 2016]. По данным В. Д. Бойцова [2008] для Баренцева моря, от которого во многом зависит водообмен Белого моря, также выделяются холодные 1978 и 1979 годы, а после 1988 г. наступил теплый период, что автор указанной работы связывает с NAO. В работе [Диксон, Майнке, 2005] показано, что NAO влияет на три основных параметра, обуславливающих океаническую циркуляцию: 1) скорость ветра; 2) скрытый и явный потоки тепла; 3) испарение или осадки.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания КарНЦ РАН «Закономерности изменений экосистем Белого моря при интенсификации освоения Арктической зоны региона и под влиянием изменений климата», № АА-АА-18-118032290034-5.

Температура в мае



Хлорофилл а в мае

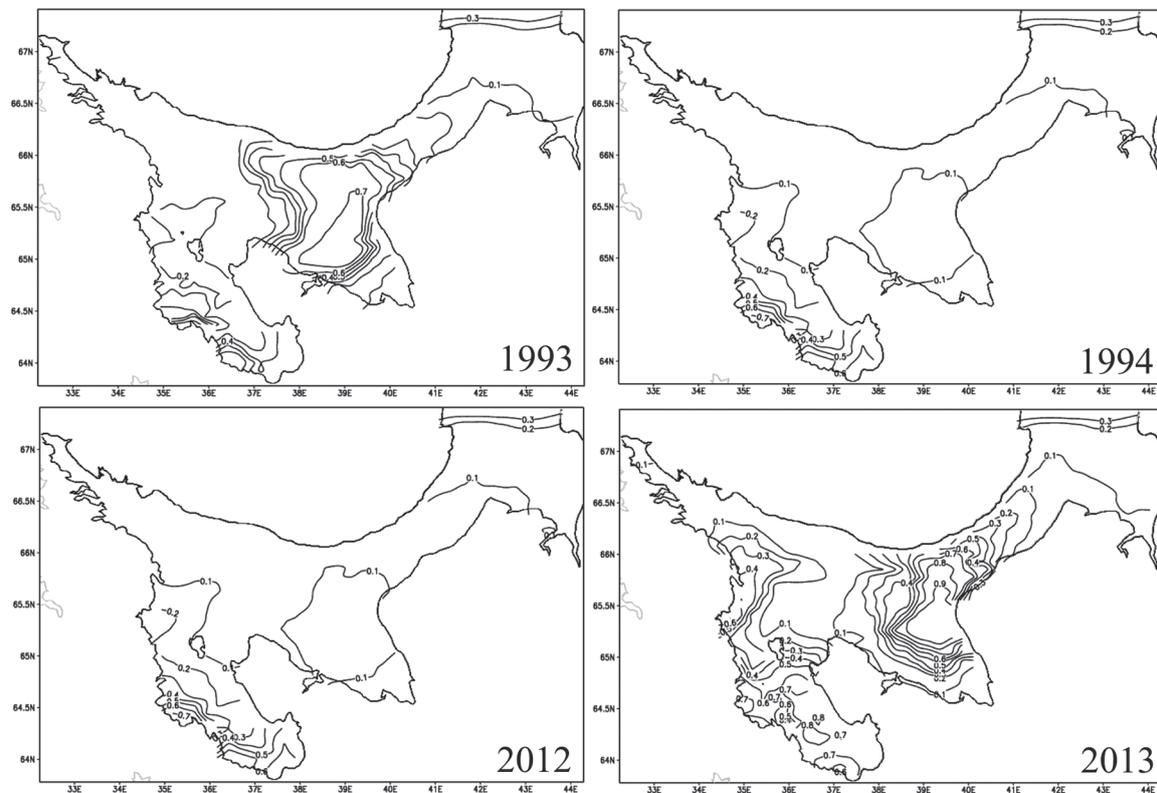


Рис. 4. Распределение модельной температуры поверхностного слоя и модельного хлорофилла а в мае в разные годы

Fig. 4. The distribution of the model temperature of the surface layer and model chlorophyll a concentration in May in different years

Литература

Астафьева Н. М., Раев М. Д. Влияние крупномасштабного удаленного атмосферного окружения на траектории тропических циклонов // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. 2010. Т. 7, № 1. С. 61–74.

База данных ЗИН РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://www.st.nmfs.noaa.gov/corpop/time-series/ru-10101/> (дата обращения: 10.12.2018).

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

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

Бойцов В. Д. Долгопериодные колебания температуры воздуха в Северной Атлантике и Северо-Европейском бассейне // Изв. РГО. 2008. Т. 140, вып. 2. С. 6–11.

Диксон Р., Майнке Й. Океанографические условия Атлантики в 1998–1999 гг. и их постепенное восстановление после экстремальных воздействий // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море: Сб. докл. междунар. симп. Мурманск: ПИНРО, 2005. С. 130–144.

Зимин А. В. Закономерности субмезомасштабных процессов и явлений в Белом море // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 104–120.

Коршунова Н. Н., Швець Н. В. Изменение норм основных климатических параметров на территории России за последние десятилетия // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2014. № 178. 125 с.

Мирвис В. М., Мелешко В. П., Гаврилина В. М., Матюгин В. А., Львова Т. Ю. Воспроизводимость Североатлантического колебания по результатам гидродинамических прогнозов на месяц и сезон, его предсказуемость и связь с качеством прогнозирования аномалий температуры воздуха на территории России // Тр. гл. геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. 2009. Вып. 560. С. 7–33.

Политова Н. В., Филиппов А. С., Володин В. Д., Здоровеннов Р. Э., Зуйкова М. В., Зыкова О. А., Кравчишина М., Потапова И. Ю., Таскаев В. Р., Толстиков А. В., Яковлев А. Е. Комплексные исследования системы Белого моря в рейсе научно-исследовательского судна «Эколог» летом 2013 г. // Океанология. 2014. Т. 54, № 6. 855 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 664 с.

Серяков Е. И. Долгосрочные прогнозы тепловых процессов в Северной Атлантике. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 168 с.

Смирнов Н. П., Воробьев В. Н., Качанов С. Ю. Северо-Атлантическое колебание и климат. СПб.: РГГМУ, 1998. 122 с.

Смирнова А. И., Терзиев Ф. С., Яковлева Н. П., Арсенчук М. О. Закономерности разномасштабной изменчивости элементов гидрометеорологического режима Белого моря, фоновые оценки их колебаний на современном этапе // Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря: материалы VIII регион. науч.-практ. конф. Беломорск, 2001. С. 22–29.

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

Толстиков А. В., Чернов И. А., Мурзина С. А., Мартынова Д. М., Яковлев Н. Г. Разработка комплекса Green JASMINE для изучения и прогнозирования состояния экосистем // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 5. С. 23–32. doi: 10.17076/eb501

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., Яковлев Н. Г. Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда // Труды КарНЦ РАН. 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.

Biogeochemical Flux Model (BFM). URL: <http://bfm-community.eu> (дата обращения: 10.12.2018).

Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatio-temporal variability in the White Sea: A modeling study // J. Mar. Syst. 2018. No. 187. P. 23–35.

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

Usov N., Kutcheva I., Primakov I., Martynova D. Every species is good in its season: Do the shifts in the annual temperature dynamics affect the phenology of the zooplankton species in the White Sea? // Hydrobiologia. 2013. Vol. 706. P. 11–33.

Vichi M., Lovato T., Lazzari P., Cossarini G., Gutierrez Mlot E., Mattia G., Masina S., McKiver W. J., Pinar di N., Solidoro C., Tedesco L., Zavatarelli M. The Biogeochemical Flux Model (BFM): equation description and user manual. BFM version 5.1. 2015. BFM Report series. N. 1. Release 1.1. July 2015. Bologna, Italy, 2015a. P. 104. URL: <http://bfm-community.eu> (дата обращения: 10.12.2018).

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 N. 2, Release 1.0, August 2015. Bologna, Italy, 2015b P. 31. URL: <http://bfm-community.eu> (дата обращения: 10.12.2018).

Поступила в редакцию 13.12.2018

References

Astaf'eva N. M., Raev M. D. Vliyanie krupnomashtabnogo udalennogo atmosfernogo okruzheniya na traektorii tropicheskikh tsiklonov [The influence of large-scale remote atmospheric environments on tropical cyclone trajectories]. *Sovremen. problemy distants. zondirovaniya Zemli iz kosmosa: Fiz. osnovy, metody i tekhnologii monitoringa okruzhayushchei sredy, potentsial'no opasnykh yavlenii i ob'ektov* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space: Phys. bases, methods and technologies for monitoring the environment, potentially dangerous phenomena and objects]. 2010. Vol. 7, no. 1. P. 61–74.

Baza dannykh ZIN RAN [Database of the Zoological Institute, Russian Academy of Sciences]. URL: <http://www.st.nmfs.noaa.gov/copepod/time-series/ru-10101/> (accessed: 10.12.2018).

Beloe more i ego vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov [The White Sea and its catchment under the influence of climatic and man-induced factors]. Eds N. N. Filatov, A. Yu. Terzhevnik. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. 335 p.

Berger V. Ya. Produktsionnyi potentsial Belogo morya. Issledovaniya fauny morei [Production potential of the White Sea. Study of marine fauna]. St. Petersburg: ZIN RAN, 2007. Vol. 60(68). 292 p.

Boitsov V. D. Dolgoperiodnye kolebaniya temperatury vozdukha v Severnoi Atlantike i Severo-Evropeskome basseine [Long-period fluctuations of air temperature in the North Atlantic and North-European basin]. *Izv. RGO* [Proceed. Russ. Geographical Society]. 2008. Vol. 140, iss. 2. P. 6–11.

Chernov I. A., Tolstikov A. V., Yakovlev 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 KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 8. P. 116–128. doi: 10.17076/mat397

Dickson R., Meinke J. Okeanograficheskie usloviya Atlantiki v 1998–1999 gg. i ikh postepennoe vosstanovlenie posle ekstremal'nykh vozdeistvii [Atlantic hydrography in 1998–1999: continued recovery from extreme forcing?]. *100 let okeanograficheskikh nablyudenii na razreze "Kolskii meridian" v Barentsevom more: Sb. dokl. mezhdunar. simp.* [100 years of oceanographic observations on the "Kola Meridian" section in the Barents Sea: Proceed. int. symp.]. Murmansk: PINRO, 2005. P. 130–144.

Korshunova N. N., Shvets N. V. Izmenenie norm osnovnykh klimaticheskikh parametrov na territorii Rossii za poslednie desyatiletia [Change of main climatic parameters in Russia over the last decades]. *Trudy VNIIGMI-MCD* [Proceed. RIHMI-WDC]. 2014. No. 178. 125 p.

Mirvis V. M., Meleshko V. P., Gavrilina V. M., Matyugin V. A., L'vova T. Yu. Vosproizvodimost' Severoatlanticheskogo kolebaniya po rezul'tatam gidrodinamicheskikh prognozov na mesyats i sezon, ego predskazyemost' i svyaz' s kachestvom prognozirovaniya anomalii temperatury vozdukha na territorii Rossii [Reproducibility of the North Atlantic Oscillation as derived in the monthly and seasonal forecasts, and its predict-

ability and connection with quality of air temperature anomalies forecasts in Russia]. *Tr. glav. geofizich. observatorii im. A. I. Voeikova* [Proceed. Voeikov Main Geophysical Observatory]. 2009. Iss. 560. P. 7–33.

Politova N. V., Filippov A. S., Volodin V. D., Zdorovenov R. E., Zuikova M. V., Zykova O. A., Kravchishina M. D., Potapova I. Yu., Taskaev V. R., Tolstikov A. V., Yakovlev A. E. Kompleksnye issledovaniya sistemy Belogo morya v reise nauchno-issledovatel'skogo sudna "Ekolog" letom 2013 g. [Comprehensive study of the White Sea system during the expedition of the research vessel "Ecolog" in summer 2013]. *Okeanologiya* [Ocenology]. 2014. Vol. 54, no. 6. 855 p.

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 3. Severnyi krai [Resources of the surface waters of the USSR. Vol. 3. Northern region]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 664 p.

Seryakov E. I. Dolgosrochnye prognozy teplovykh protsessov v Severnoi Atlantike [Long-term forecasts of thermal processes in the North Atlantic]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 168 p.

Smirnov N. P., Vorob'ev V. N., Kachanov S. Yu. Severo-Atlanticheskoe kolebanie i klimat [The North Atlantic Oscillation and climate]. St. Petersburg: RGGMU, 1998. 122 p.

Smirnova A. I., Terziev F. S., Yakovleva N. P., Arsenchuk M. O. Zakonomernosti raznomashtabnoi izmenchivosti elementov gidrometeorologicheskogo rezhima Belogo morya, fonovye otsenki ikh kolebanii na sovremennom etape [Patterns of the various-scale variability of hydrometeorological regime elements of the White Sea, background estimates of their fluctuations at the present stage]. *Probl. izuch., rats. ispolzovaniya i okhrany prirod. resursov Belogo morya: Mat. VIII region. nauch.-prakt. konf.* [Probl. of studying, rational use and protection of nat. resources of the White Sea: Proceed. 8th reg. sci. pract. conf.]. Belomorsk, 2001. P. 22–29.

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

Tolstikov A. V., Chernov I. A., Murzina S. A., Martynova D. M., Yakovlev N. G. Razrabotka kompleksa Green JASMINE dlya izucheniya i prognozirovaniya sostoyaniya ekosistem [Design and application of the Green JASMINE complex for the study and prediction of the ecosystems state and variability of the White Sea]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2017. No. 5. P. 23–32. doi: 10.17076/eb501

Tolstikov A. V., Filatov N. N., Zdorovenov R. E. Beloe more i ego vodosbor. Svid. o gos. reg. bazy dannykh № 2010620435. 16 avgusta 2010 g. [The official registration certificate No. 2010620435 dated 16.08.2010 of the database The White Sea and its catchment].

Yakovlev N. G. Vosproizvedenie krupnomashtabnogo sostoyaniya vod i morskogo l'da Severnogo Ledovitogo 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. Vol. 45, no. 3. P. 1–16.

Zimin A. V. Zakonomernosti submezomasshtabnykh protsessov i yavlenii v Belom more [Regularities of sub-mesoscale processes and phenomena in the White Sea]. *Uchenye zapiski RGGMU* [Proceed. RSHU]. 2016. No. 44. P. 104–120.

Biogeochemical Flux Model (BFM). URL: <http://bfm-community.eu> (accessed: 10.12.2018).

Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatio-temporal variability in the White Sea: A modeling study. *J. Mar. Syst.* 2018. No. 187. P. 23–35.

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

Usov N., Kutcheva I., Primakov I., Martynova D. Every species is good in its season: Do the shifts in the annual temperature dynamics affect the phenology

of the zooplankton species in the White Sea? *Hydrobiologia*. 2013. Vol. 706. P. 11–33.

Vichi M., Lovato T., Lazzari P., Cossarini G., Gutierrez Mlot E., Mattia G., Masina S., McKiver W. J., Pinar-di N., Solidoro C., Tedesco L., Zavatarelli M. The Biogeochemical Flux Model (BFM): equation description and user manual. BFM version 5.1. 2015. BFM Report series. N. 1. Release 1.1. July 2015. Bologna, Italy, 2015a. P. 104. URL: <http://bfm-community.eu> (accessed: 10.12.2018).

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 N. 2, Release 1.0, August 2015. Bologna, Italy, 2015b. P. 31. URL: <http://bfm-community.eu> (accessed: 10.12.2018).

Received December 13, 2018

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Толстиков Алексей Владимирович

руководитель лаб. географии и гидрологии, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: alexeytolstikov@mail.ru
тел.: +79114022359

Чернов Илья Александрович

старший научный сотрудник лаб. моделирования
природно-технических систем, к. ф.-м. н.
Институт прикладных математических исследований
КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: iachernov@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Tolstikov, Aleksey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: alexeytolstikov@mail.ru
tel.: +79114022359

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