

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕОБХОДИМЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В БЕЛОМ МОРЕ В ИНТЕРЕСАХ РАЗВИТИЯ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А. В. Толстиков

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
(Петрозаводск, Российская Федерация)

И. А. Чернов

Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН
(Петрозаводск, Российская Федерация)

Д. М. Мартынова

ФГБУН Зоологический институт РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 1 марта 2018 г.

Рассмотрены вопросы получения данных для задач численного моделирования Белого моря – стратегического объекта Российской Федерации. Приведен обзор доступных источников с указанием открытых баз, организаций-держателей, путей возможного использования данных для решения задач численного воспроизведения термогидродинамического состояния Белого моря, а также динамики его пелагической экосистемы.

Ключевые слова: данные, численное моделирование, Белое море, Арктика, JASMINE, BFM.

Введение

Разработка системного подхода к работе в Арктической зоне Российской Федерации включает формирование нескольких опорных зон развития, часть которых захватывает участки Белого моря с прилегающими территориями [1]. Интерес исследователей самого разного профиля к Белому морю, равно как и его важность для России, обусловлены целым рядом научных и прикладных задач, к которым относятся освоение природных ресурсов, вопросы логистики и обороны, проблемы энергетики.

Использование комплексных математических моделей, учитывающих множество протекающих в водоеме процессов, открывает широкий спектр практического применения результатов моделирования

в рыболовстве, развитии марикультуры, для военного и торгового флота, для прогнозирования экологических бедствий и колебаний климата, а также для решения фундаментальной задачи понимания закономерностей функционирования моря как целостной системы. Однако для адекватного использования моделей, их верификации и валидации необходимы данные реальных измерений параметров среды.

Требуются комплексные оценки различных гидрофизических, гидробиологических, биогеохимических характеристик. Получение таких оценок возможно несколькими путями: помимо измерения *in situ* (на береговых станциях, с борта экспедиционных судов, автономными буями) определенные параметры могут быть получены спутниковыми сенсорами [2] или при помощи численных моделей. Следует отметить,

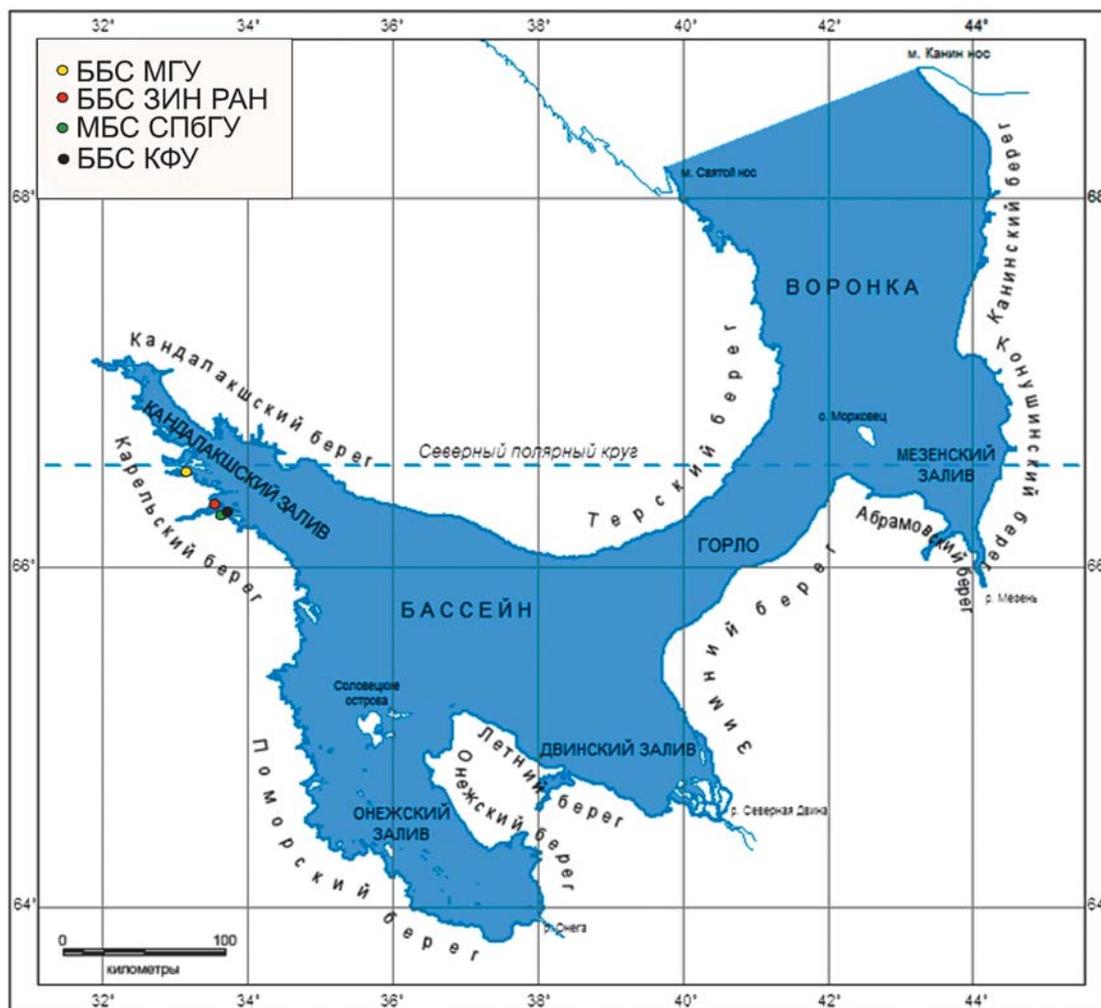


Рис. 1. Белое море: берега, районы и расположение биологических станций: ББС МГУ – Беломорская биологическая станция Московского государственного университета, ББС ЗИН РАН – Беломорская биологическая станция Зоологического института РАН, МБС СПбГУ – Морская биологическая станция Санкт-Петербургского университета, ББС КФУ – Беломорская биологическая станция Казанского федерального университета

что для настройки и верификации моделей, а также для задания начальных и граничных значений снова требуются данные *in situ* или спутниковые.

Все данные для задач моделирования процессов в море можно условно разделить на четыре большие группы: гидрофизические (температура, солёность, течения, характеристики льда и т. п.), метеорологические (давление, температура воздуха, характеристики ветра и т. д.), биогеохимические (потоки веществ и энергии, в том числе в экосистемах) и сопутствующие (батиметрия, реки водосбора и т. п.). Значительная часть этих величин может быть измерена в произвольной точке поверхности или толщи моря и потому образует поверхностное или, соответственно, трехмерное поле.

В задачи данной работы входит обсуждение существующих источников данных по Белому морю и их применение для численного моделирования термогидродинамического состояния и динамики

пелагической экосистемы этого водоема с помощью вычислительного комплекса JASMINE [3].

Данные *in situ*

Для Белого моря в известной степени существует проблема получения данных *in situ*. Регулярные наблюдения в акватории выполняются учреждениями Росгидромета, Росрыболовства, а также Министерством транспорта и Министерством обороны. Но доступ к этим данным строго регламентирован для научных организаций, которые сами во всех районах моря сезонные измерения не проводят. Осуществляются либо эпизодические, либо постоянные многолетние наблюдения, но в пределах биологических станций, фактически сосредоточенных на относительно небольшом участке Карельского берега Кандалакшского залива (рис. 1). Кроме того, измерения выполняются аппаратурой с разным разрешением, из года в год ведутся в локальных

участках и в разные сроки (обычно с июня по август) и на различных горизонтах водной толщи. Данных для поверхности моря существенно больше, чем для толщи воды.

Безусловно, основной массив данных *in situ* находится в ведении Государственной службы наблюдения Росгидромета, которая выполняет судовые рейсы с целью получения сведений по температуре и солености Белого моря, биогеохимическим показателям в поверхностном слое и толще воды в различные сезоны, включая так называемые вековые разрезы. Росгидромет ведет наблюдения на стандартной сетке гидрометеорологических станций [4] по стандартным методикам. Это регулярные, многолетние, хорошо структурированные данные. Сведения о ледовом режиме, характеристики стока впадающих в море рек, метеоданные также получают со стандартных станций. Большое значение здесь имеют береговые гидрометеорологические посты. Главное препятствие на пути использования данных Росгидромета состоит в том, что доступ к ним осуществляется исключительно на коммерческой основе, даже по официальному запросу научных учреждений. Лишь часть этих материалов можно получить бесплатно через Мировой центр данных в Обнинске — ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД)¹, который входит в структуру Росгидромета и является его главным органом по накоплению, хранению и обработке гидрометеорологической информации. Эта организация публикует региональные справочники, каталоги, создает открытые электронные ресурсы, но доступ к значительной части данных также платный.

Для задач моделирования Белого моря важны данные Зоологического института РАН (ЗИН РАН), получаемые на Беломорской биологической станции (ББС ЗИН РАН²) у мыса Картеш (см. рис. 1). Здесь в течение нескольких десятков лет каждые десять суток с мая по октябрь выполняются измерения на декадной станции Д-1. Измеряются температура и соленость в толще воды на нескольких горизонтах от 0 до 65 м (с 2010 г. — непрерывное профилирование водной толщи STD-зондом), выполняются серии ловов зоопланктона и время от времени фитопланктона, учитываются концентрации биогенных элементов. В зимний период здесь также ведутся наблюдения, но значительно реже (раз в месяц-два в зависимости от ледовой обстановки). Летом осуществляется выход на глубоководную станцию в центральной части Кандалакшского залива. Все эти данные заносятся в электронную базу³. При необходимости получить указанные данные исследователь заключает трудовое соглашение

с руководством ББС ЗИН РАН, в котором оговариваются условия их использования. Часть материалов ББС ЗИН РАН получена в совместном проекте с американским Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (NOAA)⁴, и сейчас эти данные доступны в электронном виде на сайте NOAA⁵.

Учебно-методические станции университетов, которые вносят значительный вклад в пополнение знаний о Белом море за счет данных *in situ*, расположены, как и ББС ЗИН РАН, на Карельском берегу (см. рис. 1). Биологическая база МГУ⁶ находится севернее губы Чупа, Морская биологическая база СПбГУ⁷ и база Казанского федерального университета⁸ — на острове Средний. Здесь также проводятся измерения гидрофизических и биогеохимических параметров. Помимо непосредственной работы на станциях университеты проводят выездные работы на Белом море [5], регистрируют базы данных по гидрологическим характеристикам и биогеохимическим показателям. Большинство этих баз авторские.

В Институте океанологии РАН им. П. П. Ширшова⁹ (ИО РАН), включая его петербургский филиал, ежегодно проводятся судовые исследования на Белом море [6—8].

Многолетние учебные практики Российского государственного гидрометеорологического университета¹⁰ на Белом море позволили собрать значительный объем данных по температуре, солености и течениям этого водоема.

Данные Мурманского морского биологического института Кольского научного центра РАН¹¹ (ММБИ КНЦ РАН) содержат информацию по судовым измерениям температуры и солености начиная с 1891 г. в различные сезоны и различные годы. Кроме того, здесь накоплен массив экспедиционных данных по экосистемным показателям (биогенные элементы, распределение хлорофилла «а» и т. п.). В совместном проекте ММБИ КНЦ РАН и NOAA «Climatic Atlas of the Arctic Seas 2004: Part I. Database of the Barents, Kara, Laptev, and White Seas — Oceanography and Marine Biology» представлены материалы, снабженные пояснительной информацией на бумажном носителе. Они представляют собой карты температуры и солености совместно Белого и Баренцева морей, что важно для настройки граничных условий в модели.

Экспедиционные данные Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН¹²

¹ <http://meteo.ru/>.

² <http://www.zin.ru/kartesh/>.

³ <http://www.st.nmfs.noaa.gov/copepod/time-series/ru-10101/>.

⁴ <http://www.noaa.gov/>.

⁵ https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WH_SEA/WWW/HTML/atlas.html.

⁶ <http://www.wsbs-msu.ru/>.

⁷ <http://spbu.ru>.

⁸ <http://kpfu.ru>.

⁹ <https://ocean.ru/>.

¹⁰ <http://www.rshu.ru/>.

¹¹ <http://www.mmbi.info/>.

¹² <http://water.krc.karelia.ru/>.

(ИВПС КарНЦ РАН), ныне входящего в структуру Федерального исследовательского центра РАН, полученные в том числе в ходе совместных исследований со многими организациями, также представляют значительный интерес для решения вопросов настройки математических моделей. В результате работы ИВПС КарНЦ РАН в экспедициях собрана база данных по температуре и солености Белого моря, распределению биогенных элементов и хлорофилла «а» на различных горизонтах в разных районах с 2000 г. по настоящее время, преимущественно в летний период. Вся эта информация содержится в офлайн-базе данных [9] и предоставляется по запросу.

Отдельный интерес представляют данные Института экологических проблем Севера¹³ Уральского отделения РАН (Архангельск), который сейчас входит в структуру Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова РАН. Собран материал по термогидродинамике, гидрохимии и экологии Белого моря.

В Северном полярном научно-исследовательском институте морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича¹⁴ (учреждении Росрыболовства в Архангельске) накоплены данные по промыслу водорослей, рыбы и морских млекопитающих Белого моря. Значительная часть экспедиционных работ, выполняемых институтом, относится к мониторинговым, что повышает значимость этих материалов, однако доступ к ним строго регламентирован.

Данные по рекам, впадающим в Белое море, можно найти, как указывалось выше, в Росгидромете, но из бесплатных ресурсов наиболее удобен R-ArcticNET¹⁵, содержащий данные по расходу рек, включая Северную Двину, Онегу, Мезень, Ковду, Поной, Беломорско-Балтийский канал. Диапазон лет ограничен 1999 г. (для ряда рек — значительно раньше).

На сайте Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова размещен ресурс для получения сведений о приливах, в том числе Белого моря¹⁶.

При моделировании гидрофизических и биогеохимических процессов необходима информация по батиметрии. В совместном проекте российских и финских коллег [10] была создана батиметрическая карта Белого моря. Известна подробная карта, разработанная на основе морфогенетического анализа рельефа дна Белого моря [11]. Специалисты по моделированию часто используют ресурс ETOPO (глобальная цифровая модель рельефа) на сайте NOAA¹⁷.

Особый интерес для оценки адекватности численной модели представляют атласы Белого моря. Большая их часть [12—16] содержит комплексную информацию по Белому морю. Наиболее подробен по гидрометеорологическому разделу электронный атлас проекта ЕСИМО «Климат морей России и ключевых районов Мирового океана. Белое море»¹⁸. Головной организацией этого проекта является ВНИИГМИ-МЦД. В настоящее время создается новый комплексный атлас Белого моря и водосбора, работа над которым инициирована в ИВПС КарНЦ РАН [17]. Атлас содержит материалы практически всех организаций, которые перечислены выше. В 2017 г. зарегистрирована электронная офлайн-версия [18], создан оригинал-макет печатной версии атласа. Здесь содержится иллюстративный материал, включая карты, схемы, описания согласно физико-географической структуризации (тектоника и геология, климат, гидрология, биология, охраняемые территории и т. д.). Информация, включенная в атлас, хранится в ИВПС КарНЦ РАН и предоставляется по запросу.

В табл. 1 дана сводка открытых интернет-ресурсов, позволяющих получить некоторый набор данных по термогидродинамике, биогеохимии, метеопараметрам, рельефу дна, рекам, впадающим в Белое море.

Данные дистанционного зондирования

Значительную часть материалов для верификации моделей могут предоставить спутниковые ресурсы, которые содержат информацию по Белому морю. Например, «Bio-Optical Characteristics of the Russian Seas from Satellite Ocean Color Data of 1998—2012»¹⁹, где есть информация по распределению температуры поверхности, взвешенного и желтого вещества, коэффициента обратного рассеяния, хлорофилла «а» для теплого периода года. Часть материалов спутниковых данных (распределение температуры и хлорофилла «а») была получена в 2009 г. в ходе совместных работ ИВПС КарНЦ РАН и Международного центра по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Ф. Нансена. Все эти данные содержатся в базе [9].

Многие спутниковые данные относительно просто получить самостоятельно, так как доступ к ним открыт. Например, удобно использовать ресурсы NOAA²⁰, NASA²¹, СКАНЕКС²². Следует выделить научно-исследовательский центр по космической гидрометеорологии «Планета»²³, включающий центр спутниковой информации ЕСИМО. Этот центр относится к Федеральной службе по гидрометеорологии

¹⁸ http://www.esimo.ru/atlas/Beloe/1_1.html.

¹⁹ <http://optics.ocean.ru>.

²⁰ <https://www.nvnl.noaa.gov/view/globaldata.html>.

²¹ <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>.

²² <http://new.scanex.ru/>.

²³ <http://planet.iitp.ru>.

¹³ <http://fciarctic.ru/index.php?page=iepn>.

¹⁴ <http://www.pinro.ru/15/index.php/structure/sevpinro#>.

¹⁵ <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>.

¹⁶ <http://www.oceanography.ru/index.php/2010-12-01-06-45-18>.

¹⁷ <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>.

Таблица 1. Сводка открытых данных интернет-ресурсов по Белому морю

Организация	Гидрофизические данные (период)	Биогеохимические данные (период)	Метеорологические данные (период)	Сопутствующие данные (период)
ВНИИГМИ-МЦД	http://www.esimo.ru/atlas/Beloe/1_1.html (температура воды и воздуха, соленость, плотность, уровень моря, скорость звука, волны, кислород, ветер) (1999—2006 гг.)			—
ЗИН РАН	https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WH_SEA/WWW/HTML/atlas.html (температура, соленость, хлорофилл «а», фитопланктон, зоопланктон, биогенные элементы) (1963—1998 гг.). Массив данных, охватывающий период с 1999 г. по настоящее время, предоставляется по запросу		—	—
ИО РАН	http://optics.ocean.ru/styled-10/styled-38 (температура, хлорофилл «а», коэффициент обратного рассеяния, желтое вещество, взвесь) (1998—2012 гг.)		—	—
NOAA	https://www.nvvl.noaa.gov/view/globaldata.html (гидрологические характеристики (0 и 100 м), распределение льда, биогенные элементы, хлорофилл «а») (1985—2012 гг.)		https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html (метеоданные реанализа) (с 1948 г. по настоящее время)	https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/ — рельеф дна
Ocean Color WEB	—	http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/ (с 1996 г. по настоящее время)	—	—
R-ArcticNET	—	—	—	http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html — реки (для Северной Двины 1881—1999 гг.)

и мониторингу окружающей среды. О ледовой обстановке в Белом море удобно узнавать через ресурс «Мультимапс»²⁴. Здесь используется информация со спутников «Тerra», «Aqua» и «Suomi NPP», с помощью календаря выбираются требующиеся даты. Кроме того, присутствуют батиметрическая карта и анимированные карты ветров, волн, облачности и др. Дается краткосрочный прогноз состояния водной поверхности и прогноз погоды.

Справочные данные Российского морского регистра судоходства [19] представляют собой полезную информацию для настройки математических моделей. Здесь содержится информация о режимном распределении скоростей ветра, высот волн по сезонам, расчетные повторяемости экстремальных событий за различные периоды, включая 30- и 100-летний. Это необходимые материалы по волнению и ветрам Белого моря. Кроме данных

Росгидромета морской регистр в том числе использует данные реанализа NCEP/NCAR.

Реанализ NCEP/NCAR — это метеорологические данные NOAA, выполненные для всего Земного шара на регулярной сетке начиная с 1948 г., шаг по времени — 6 ч. Эти данные (поля атмосферного давления, ветра, температуры воздуха и т. д.) ежемесячно обновляются и находятся в свободном для исследователей доступе²⁵. Данные NCEP/NCAR — один из наиболее часто используемых атмосферных блоков для моделирования морей. Сводка ресурсов, предоставляющих данные реанализа, доступна на страницах NCAR/UCAR²⁶ и Гамбургского университета²⁷.

Следует отметить, что при использовании спутниковой информации применительно к Белому морю

²⁵ <https://rda.ucar.edu/datasets/ds090.0/#!description>.

²⁶ <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atmospheric-reanalysis-overview-comparison-tables>.

²⁷ <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/projekte/easy-init/easy-init-ocean.html>.

²⁴ <https://multimaps.ru>.

существует ограничение, связанное с повышенной облачностью над акваторией водоема. Кроме того, имеется ряд претензий к расчетным алгоритмам спутников, которые часто искажают реальные (in situ) показатели [20].

Комплексные численные модели

Численные модели широко применяются для воспроизведения термогидродинамического состояния моря в целом, позволяя оценивать трехмерные и поверхностные поля на сетках заданного разрешения с различным усреднением по времени. Возможно воспроизведение временной динамики в точке, средних значений по всему морю либо его части. Модели помогают оценить величины, которые не поддаются измерению либо измерение которых чрезмерно затратно или опасно. К таким параметрам относятся водообмен между частями моря, двумя морями, состояние моря подо льдом и т. д. Есть возможность постановки численных экспериментов для расчета последствий тех или иных действий, событий или обстоятельств. Примерами могут служить расчеты динамики разлива нефти, других видов загрязнений моря, воздействие повышения температуры воздуха на экосистемы вследствие глобального потепления.

Следует иметь в виду, что численная модель предоставляет значения величин на сетке с теми или иными шагами по горизонтальным координатам и на определенных горизонтах. Шаг горизонтальной сетки для небольших морей, в том числе Белого, составляет несколько километров (в лучшем случае несколько сот метров, но нам неизвестны такие модели для Белого моря в целом). Это создает определенное противоречие между модельными предсказаниями сильно варьирующих величин (таких, например, как биогеохимические характеристики, включая концентрацию хлорофилла «а») и измерениями in situ. В самом деле, пробы в близких участках, взятые с небольшим интервалом времени, могут давать расхождение величин на порядок [20], тогда как с точки зрения модели эти пробы соответствуют одному узлу пространственно-временной сетки. Локальные особенности гидрологического режима (впадающий в море ручей, интенсивные течения в проливе между небольшими островами, припай и т. п.) способны существенно влиять на локальные значения многих величин, что совершенно прозрачно для модели, не способной разрешать объекты такого масштаба.

Для обеспечения работоспособности модели необходимы начальные и граничные значения. Начальные поля нужны в один момент времени, но на всей трехмерной сетке. Эта трудность известна как «проблема начальных данных». Иногда приходится прибегать к вычислительно затратным методам ассимиляции данных [21]. К счастью, для Белого моря данная проблема менее остра из-за характерной особенности — доминирующего влияния мощного прилива [22; 23]. Приливная динамика определяет

устойчивую картину циркуляции, температуры и солености, а также пассивных примесей (включая и биогеохимические концентрации). Численные эксперименты подтвердили это утверждение. Кроме того, Белое море свободно ото льда летом: характеристики льда определяются термогидродинамическим состоянием моря и не зависят от начального распределения.

В связи со всем сказанным для задания начальных значений в модели Белого моря требуются средние значения по горизонтам всего моря или его частей. Эти значения можно оценить по данным из источников, которые обсуждались выше.

Что касается граничных условий, то для Белого моря это значения на границе с Баренцевым морем («жидкая граница») и в устьях рек. Из-за сравнительно малых глубин в устьях достаточно оценок на поверхности. В отличие от начальных граничные значения необходимы в небольшом числе точек пространственной сетки, однако в каждый момент времени. Разумным компромиссом выглядит использование среднемесячных данных типичного года (например среднепогодных). Актуальна задача оценки чувствительности модели к граничным значениям.

Так как баланс осадков и испарения в Белом море близок к равновесию [4], а сток рек значителен (4% объема моря в год), баланс водообмена Белого и Баренцева морей смещен в сторону стока из Белого моря [22]. Поэтому можно предположить определенную нечувствительность характеристик моря к вариациям значений на жидкой границе, по крайней мере при расчетах на срок до нескольких лет. Численный эксперимент подтверждает это предположение. Мы увеличили граничное значение температуры на 2°C и сравнили среднесуточную температуру поверхностного слоя по акватории всего Белого моря и его частей с эталонным расчетом. В течение третьего года (расчетный период 2003—2005 гг.) среднегодовое отклонение температуры не превысило для всего моря 0,3°C, а максимальное среднее отклонение составило 0,9°C в Мезенском заливе и 1,2°C в Воронке. За три года не наблюдается повышения средней или максимальной температуры поверхностного слоя, в том числе в Воронке (И. А. Чернов и др., неопубл.).

Существует немного комплексных моделей Белого моря (по сравнению, например, с Балтийским морем). Среди них модель оперативного мониторинга гидрофизических полей Белого моря [23; 24] и ныне не поддерживаемая модель И. А. Неелова, сопряженная с моделью морской экосистемы О. П. Савчука [22]. В Карельском научном центре РАН развивается комплексная модель динамики и термодинамики вод, льда и экосистемы Белого моря JASMINE [3] при поддержке Института вычислительной математики РАН (Москва) и OGS (Триест, Италия). Она основана на модели Северного Ледовитого океана [25] и описывает трехмерные течения, термохалинные поля

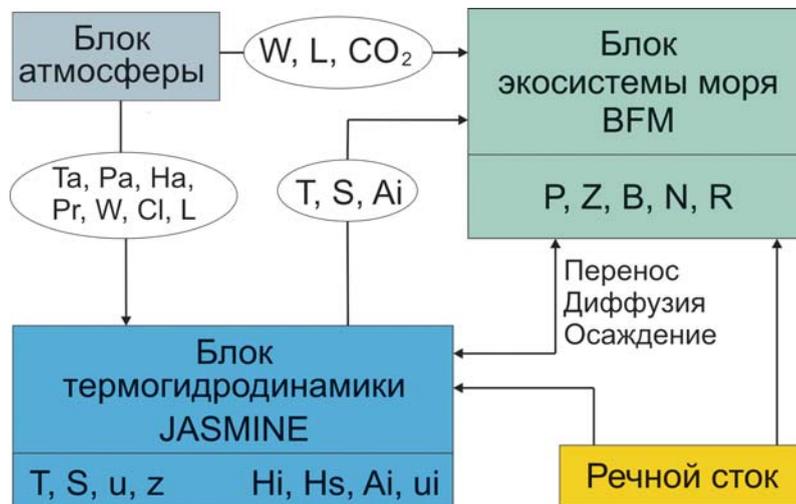


Рис. 2. Схема сопряжения блоков в модели: W – скорость ветра, L – освещенность, CO_2 – углекислый газ в атмосфере, T_a – температура воздуха, P_a – давление на уровне моря, H_a – влажность воздуха, P_r – осадки, Cl – облачность. T – температура воды, S – соленость, u – векторная скорость течений, z – уровень моря, H_i – количество льда, H_s – количество снега, A_i – сплоченность морского льда, u_i – векторная скорость дрейфа льда, P – характеристики фитопланктона, Z – зоопланктона, B – бактериопланктона, N – концентрации биогенного неорганического вещества, R – концентрации и характеристики неживой органики

и морской лед как ансамбль льдин со снегом и распределением по толщине (рис. 2). В качестве биогеохимического блока выбрана модель BFM [26], поддерживаемая международным консорциумом из нескольких организаций (входит в комплекс NEMO [27] и MIT [28]).

В настоящее время возможности модели JASMINE включают:

- воспроизведение основных гидрологических полей с шагом сетки до 5 км;
- определение скорости дрейфа льда, объема льда и снега на нем, сплоченности льда;
- численную адвекцию трехмерных, плавучих и тонущих пассивных примесей (трассеров);
- вычисление динамики пелагической экосистемы и определение полей концентрации биогенных элементов, биомассы различных групп фито- и зоопланктона, пелагических бактерий, растворенного и взвешенного в воде вещества, компонент детрита;
- расчет ряда характеристик экосистем, не являющихся переменными модели: полной и чистой первичной и вторичной продукции, дыхания различных групп организмов, соотношения азота и фосфора к углероду в составе организмов и многого другого;
- реминерализацию быстрой и медленной фракций органики на морском дне бентосной экосистемой (отметим, что тонущее вещество реминерализуется также пелагическими бактериями).

Начальные и граничные значения гидрофизических и биогеохимических величин для моделирования динамики комплексного состояния Белого моря берутся из отчетов многолетних экспедиционных работ нескольких институтов (Института водных

проблем Севера Карельского научного центра РАН, Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Зоологического института РАН), авторских баз данных и спутниковых ресурсов. Для верификации модели используются все перечисленные выше источники, особое внимание уделяется консультациям с профильными специалистами, изучающими Белое море.

Заключение

Судовые измерения остаются необходимым звеном в получении данных для различных задач численного моделирования. Открытый доступ к ресурсам Росгидромета для научных организаций, согласованный по нормам использования материалов, смог бы решить большинство проблем, связанных с нехваткой данных. Однако прогресса в этом направлении пока нет, и все данные предоставляются на коммерческой основе. Это касается абсолютно всех морей Российской Федерации и в первую очередь морей российского сектора Арктики, где другие страны практически не могут работать. Поэтому большая часть данных фактически «добывается» из всех возможных источников или получается в ходе совместных работ различными институтами. Часто это комплексные экспедиции, информация о которых попадает во все организации, являющиеся соисполнителями, отражаясь затем в научных отчетах. Для получения таких данных необходимо контактировать с организаторами экспедиционных работ.

Можно надеяться, что постоянно улучшающиеся алгоритмы интерпретации спутниковых данных и сканеры с более высоким разрешением помогут ликвидировать пробелы, связанные с нехваткой данных. Однако в Белом море, которое в среднем более двухсот дней в году закрыто облачностью, сделать

это не так просто. Данные *in situ* для настройки численных моделей являются необходимой составляющей адекватного воспроизведения процессов и тем более расчетов на перспективу и прогнозов состояния моря. Перечисленные открытые источники и организации — держатели данных помогут исследователям, занимающимся Белым морем.

Работа выполнена по теме НИР «Закономерности изменений экосистем Белого моря при интенсификации освоения Арктической зоны региона и под влиянием изменений климата», номер государственной регистрации АААА-А18-118032290034-5, грант РФФИ № 16-45-100162 p_a.

Литература

1. Филатов Н. Н., Тержевик А. Ю., Дружинин П. В. Беломорье — регион для решения актуальных проблем Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2011. — № 2. — С. 90—101.
2. Холод А. Л. Обзор продуктов Службы мониторинга морской среды Copernicus, доступных для Арктического региона // Мор. гидрофиз. журн. — 2017. — № 2. — С. 28—38.
3. Чернов И. А., Толстиков А. В., Яковлев Н. Г. Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда // Тр. КарНЦ РАН. — 2016. — Т. 8. — С. 116—128.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. — Т. 4: Белое море. — Вып. 1: Гидрометеорологические условия. — Л.: Гидрометеоиздат, 1991. — 196 с. — (Справочник «Моря СССР»).
5. Ильяш Л. В., Белевич Т. А., Ступникова А. Н. и др. Влияние локальных гидрофизических условий на пространственную изменчивость фитопланктона Белого моря // Океанология. — 2015. — Т. 55, № 2. — С. 241—251.
6. Шевченко В. П., Стародымова Д. П., Виноградова А. А. и др. Элементный и органический углерод в атмосферном аэрозоле над северо-западным побережьем Кандалакшского залива Белого моря // Докл. Акад. наук. — 2015. — Т. 461, № 1. — С. 70—74.
7. Кобылянский С. Г., Дриц А. В., Мишин А. В. и др. Мелкомасштабное распределение личинок сельди (*Clupea Pallasii Marisalbi*) и структура вод в районах нереста в Белом море // Океанология. — 2014. — Т. 54, № 6. — С. 805—815.
8. Зимин А. В., Атаджанова О. А., Романенков Д. А. и др. Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений // Исследование Земли из космоса. — 2016. — Т. 1—2. — С. 129—135.
9. Толстиков А. В., Филатов Н. Н., Здоровеннов Р. Э. Белое море и его водосбор. — Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2010620435 от 16 августа 2010 г.
10. Kaitala S., Shavykin A., Volkov V. Environmental GIS database for the White sea // Proceedings of the Open

source GIS-GRASS users conference. — Trento, Italy, 2002.

11. Никифоров С. Л., Кошель С. М., Фроль В. В. Цифровая модель рельефа дна Белого моря // Вестн. Моск. ун-та. — 2012. — № 3. — С. 86—92.
12. Океанографические условия и биологическая продуктивность Белого моря: Аннотированный атлас. — Мурманск: ПИНРО, 1991 — 115 с.
13. Биологический атлас морей Арктики 2000: Планктон Баренцева и Карского морей / Под ред. Г. Г. Матишова, П. Р. Макаревича, С. Ф. Тимофеева и др. — Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2000.
14. Final report of INCO-Copernicus Project “WHITESEA” № ICA2-CT-2000-10014: “Sustainable management of the marine ecosystem and living resources of the White Sea”. — [S. l.]: NERSC, 2003. — 220 p.
15. Климатический атлас морей Арктики 2004: Часть Базы данных Баренцева и Белого морей — океанография и морская биология / Г. Г. Матишов, А. Н. Зуев, В. А. Голубев и др. — Silver Spring, MD, 2004.
16. Атлас биологического разнообразия морей и побережий российской Арктики / Под ред. В. А. Спиридонова, М. В. Гаврило, Е. Д. Краснова, Н. Г. Николаева. — М.: WWF России, 2011. — 64 с.
17. Филатов Н. Н., Толстиков А. В., Богданова М. С. и др. Создание информационной системы и электронного атласа по использованию ресурсов Белого моря и его водосбора // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 3 (15). — С. 18—29.
18. Толстиков А. В., Филатов Н. Н., Богданова М. С. и др. Электронный атлас Белого моря и его водосбора. — Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2017620252 от 1 марта 2017 г.
19. Справочные данные по режиму ветра и волнения Берингова и Белого морей (электронный аналог печатного издания, утвержденного 07.12.10): Отчет / Рос. мор. регистр судоходства. — СПб., 2010.
20. Кравчишина М. Д., Буренков В. И., Копелевич О. В. и др. Новые данные о пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла а в Белом море // Докл. Акад. наук. — 2013. — Т. 448, № 3. — С. 342—348.
21. Марчук Г. И., Залесный В. Б. Моделирование циркуляции Мирового океана с четырехмерной вариационной ассимиляцией полей температуры и солёности // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. — 2012. — Т. 48, № 1. — С. 21—36.
22. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н. Н. Филатова, А. Ю. Тержевика. — Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. — С. 335.
23. Семенов Е. В. Численное моделирование динамики Белого моря и проблема мониторинга // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. — 2004. — Т. 40, № 1. — С. 128—141.
24. Волженский М. Н., Родионов А. А., Семенов Е. В. и др. Опыт верификации оперативной модели для мониторинга гидрофизических полей Белого моря

- // Фундамент. и приклад. гидрофизика. — 2009. — Т. 2, № 3. — С. 33—41.
25. Яновлев Н. Г. О воспроизведении полей температуры солености Северного Ледовитого океана. — Ч. 1: Численная модель и среднее состояние // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. — 2012. — Т. 48, № 1. — С. 100—116.
26. Vichi M., Lovato T., Lazzari P. et al. The Biogeochemical Flux Model (BFM): Equation Description and User Manual. BFM version 5.1 / BFM Consortium. — [S. l.], 2015.
27. 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 Consortium. — [S. l.], 2015.
28. Cossarini G., Querin S., Solidoro C. et al. Development of BFMCOUPLER (v1.0), the coupling scheme that links the MITgcm and BFM models for ocean biogeochemistry simulations // Geoscientific Model Development. — 2017. — Vol. 10. — P. 1423—1445.

Информация об авторах

Толстиков Алексей Владимирович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (185030, Россия, Петрозаводск, проспект Александра Невского, 50), e-mail: alexeytolstikov@mail.ru.

Чернов Илья Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН (185910, Россия, Петрозаводск, Пушкинская ул., 11).

Мартынова Дарья Михайловна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Беломорская биологическая станция Зоологического института РАН (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 1).

Библиографическое описание данной статьи

Толстиков А. В., Чернов И. А., Мартынова Д. М. Решение проблемы необходимых данных для численного моделирования процессов в Белом море в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 2 (30). — С. 45—55. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-45-55.

SOURCES OF DATA FOR NUMERICAL SIMULATION OF THE WHITE SEA FOR DEVELOPING THE RUSSIAN ARCTIC AREA

Tolstikov A. V.

Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)

Chernov I. A.

Institute of Applied Mathematical Research of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)

Martynova D. M.

Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Analysis of statistical information on the results of expeditionary research is carried out within the framework of the theme of research “Regularities of changes in the ecosystems of the White Sea in the intensification of development of the Arctic zone of the region and under the influence of climate change”, no. AAAA-A18-118032290034-5. Modelling of thermohydrodynamic and biogeochemical processes in the White Sea is carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 16-45-100162 p_a.

Abstract

In the paper we discuss the problem of getting data for numerical modelling of the White sea. It completely belongs to Russia and is important due to a number of human activities including fisheries, mollusk farms, mining, tourism, maritime shipping. Also, the Northern Sea Route begins in the White Sea. Large projects demand com-

plete understanding of variability of hydrophysical and biogeochemical processes in the sea, so it is important to reproduce the most important processes by numerical models. This is important not only for the White sea, but for the Arctic region in general. By data we mean hydrophysical (water temperature, salinity, density, ice and snow thickness, etc), hydrobiological (biomass of plankton, productivity, etc), biogeochemical (dissolved or suspended biogen or organic matter, detritus, etc) fields. Also meteorological and miscellaneous data (bathymetry, rivers) are necessary. Values of these and other fields can be obtained by three different ways. First, this is in situ measurements (from scientific vessels or by automatic devices); then, remote sensing, usually by satellites; finally, numerical models are able to evaluate the data. However, tuning and verification of models also demand in situ or satellite data.

We survey the in situ data sources and collections, together with institutions that gather data and conditions of data availability. Also, an overview of satellite data sources is presented. Finally, we discuss simulation of the sea by numerical models and present our model JASMINE with BFM as a biogeochemical component, focusing on necessary initial, boundary, and forcing data.

Keywords: data, numerical modelling, simulation, White Sea, Arctic, JASMINE, BFM.

References

1. Filatov N. N., Terzhevik A. Yu., Druzhinin P. V. Belomor'e — region dlya resheniya aktual'nykh problem Arktiki. [Belomorie is the region of the Arctic challenges solving]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2011, no. 2, pp. 90—101. (In Russian).
2. Kholod A. L. Overview of the Copernicus marine environment monitoring service products available for the Arctic region *Physical Oceanography*, 2017, no. 2, pp. 25—35.
3. 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]. Tr. KarNTs RAN, 2016, vol. 8, pp. 116—128. (In Russian).
4. Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR. Vol. 4: Beloe more. Iss. 1: Gidrometeorologicheskie usloviya. [Hydrometeorology and hydrochemistry of seas of the USSR. The White Sea. Reference book "Seas of the USSR"]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991, 196 p. (Spravochnik "Morya SSSR"). (In Russian).
5. Ilyash L. V., Belevich T. A., Stupnikova A. N. et al. Effects of local hydrophysical conditions on the spatial variability of phytoplankton in the White Sea. *Oceanology*, 2015, vol. 55, no. 2, pp. 216—225.
6. Shevchenko V. P., Starodymova D. P., Vinogradova A. A. et al. Elemental and organic carbon in atmospheric aerosols over the northwestern coast of Kandalaksha Bay of the White Sea. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 461, no. 1, pp. 242—246.
7. Kobylyanskii S. G., Drita A. V., Mishin A. V. et al. Small scale distribution of the White sea herring larvae (*Clupea pallasii marisalbi*) in relation to hydrophysical feature. *Oceanology*, 2014, vol. 54, no. 6, pp 752—762.
8. Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Romanenkov D. A. et al. Submezomasshtabnye vikhri v Belom more po dannym sputnikovykh radiolokatsionnykh izmerenii. [Sub-Mesoscale Eddies in the White sea according to satellite radar measurements]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, vol. 1—2, pp. 129—135. (In Russian).
9. Tolstikov A. V., Filatov N. N., Zdorovenov R. E. The White Sea and its watershed. Database registration certificate no. 2010620435. 16 August 2010.
10. Kaitala S., Shavykin A., Volkov V. Environmental GIS database for the White sea // Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference. — Trento, Italy, 2002.
11. Nikiforov C. L., Koshelev S. M., Frolov V. V. Tsifrovaya model' rel'efa dna Belogo morya. [Digital terrain model of the White Sea bottom]. *Vestn. Mosk. un-ta*, 2012, no. 3, pp. 86—92. (In Russian).
12. Okeanograficheskie usloviya i biologicheskaya produktivnost' Belogo morya: Annotirovannyi atlas. [Oceanographic Conditions and biological productivity of the White sea: Annotated atlas]. Murmansk, PINRO, 1991, 115 p. (In Russian).
13. Biologicheskii atlas morei Arktiki 2000: Plankton Barentseva i Karskogo morei. [Biological Atlas of Arctic Seas 2000: Plankton of the Barents and Kara seas]. Pod red. G. G. Matishova, P. R. Makarevicha, S. F. Timofeeva et al. Murmansk, MMBI KNTs RAN, 2000. (In Russian).
14. Final report of INCO-Copernicus Project "WHITE-SEA" № ICA2-CT-2000-10014: "Sustainable management of the marine ecosystem and living resources of the White Sea". [S. l.], NERSC, 2003, 220 p.
15. Klimaticheskii atlas morei Arktiki 2004: Chast' Bazy dannyykh Barentseva i Belogo morei — okeanografiya i morskaya biologiya. [Climate Atlas of the Arctic Seas 2004: A part of the database for the Barents and White seas — Oceanography and marine biology]. G. G. Matishov, A. N. Zuev, V. A. Golubev et al. Silver Spring, MD, 2004. (In Russian).
16. Atlas biologicheskogo raznoobraziya morei i poberezhii rossiiskoi Arktiki. [Atlas of biodiversity of Russian arctic seas and coasts]. Pod red. V. A. Spiridonova, M. V. Gavrilov, E. D. Krasnova, N. G. Nikolaeva. Moscow, WWF Rossii, 2011, 64 p. (In Russian).
17. Filatov N. N., Tolstikov A. V., Bogdanova M. S. et al. Sozdanie informatsionnoi sistemy i elektronnoy atlasa po ispol'zovaniyu resursov Belogo morya i ego vodosbora. [Development of an information system and electronic atlas for using resources of the White Sea and its watershed]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2014, no. 3 (15), pp. 18—29. (In Russian).
18. Tolstikov A. V., Filatov N. N., Bogdanova M. S. et al. Electronic atlas of the White Sea and its watershed.

- Database registration certificate no. 2017620252, 1 March 2017. 2017.
19. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Beringova i Belogo morei (elektronnyi analog pechatnogo izdaniya, utverzhdennogo 07.12.10): Otchet. [Reference data on wind and waves of the Bering and White seas (Electronic version of the printed edition, published 07.12.10): Report]. Ros. mor. registr sudokhodstva. St. Petersburg, 2010. (In Russian).
20. Kravchishina M. D., Burenkov V. I., Kopelevich O. V. et al. New data on the spatial and temporal variability of the chlorophyll a concentration in the White sea. Doklady Earth Sciences, 2013, vol. 448, no. 1, pp 120—125.
21. Marchuk G. I., Zalesnyi V. B. Modeling of the world ocean circulation with the four-dimensional assimilation of temperature and salinity fields. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 15—29.
22. Beloe more i ego vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov. [The White Sea and its watershed under influences of climate and anthropogenic impact]. Pod red. N. N. Filatova, A. Yu. Terzhevika. Petrozavodsk, Karel. nauch. tsentr RAN, 2007, 335 p. (In Russian).
23. Semenov E. V. Chislennoe modelirovanie dinamiki Belogo morya i problema monitoring. [Numerical modelling of the White Sea dynamics and monitoring problem]. Izv. RAN. Ser. Fizika atmosfery i okeana, 2004, vol. 40, no. 1, pp. 128—141. (In Russian).
24. Volzhenskii M. N., Rodionov A. A., Semenov E. V. et al. Opyt verifikatsii operativnoi modeli dlya monitoringa gidrofizicheskikh polei Belogo morya. [Experience of verification of an operational model for monitoring hydrophysical fields of the White Sea]. Fundament. i priklad. gidrofizika, 2009, vol. 2, no. 3, pp. 33—41. (In Russian).
25. Yakovlev N. G. On the simulation of temperature and salinity fields in the Arctic Ocean. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 86—101.
26. Vichi M., Lovato T., Lazzari P. et al. The Biogeochemical Flux Model (BFM): Equation Description and User Manual. BFM version 5.1 BFM Consortium. [S. l.], 2015.
27. 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 Consortium. [S. l.], 2015.
28. Cossarini G., Querin S., Solidoro C. et al. Development of BFMCOUPLER (v1.0), the coupling scheme that links the MITgcm and BFM models for ocean biogeochemistry simulations. Geoscientific Model Development, 2017, vol. 10, pp. 1423—1445.

Information about the authors

Tolstikov Alexey Vladimirovich, PhD, Senior Researcher, Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (50, A. Nevskogo prosp., Petrozavodsk, Russia, 185030), e-mail: alexeytolstikov@mail.ru.

Chernov Ilya Aleksandrovich, PhD, Senior Researcher, Institute of Applied Mathematical Research of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (11, Pushkinskaya st., Petrozavodsk, Russia, 185910).

Martynova Daria Mikhailovna, PhD, Senior Researcher, White Sea Biological Station, Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences (1, Universitetskaya naberejnaya, Saint Petersburg, Russia, 199034).

Bibliographic description

Tolstikov A. V., Chernov I. A., Martynova D.M. Sources of data for numerical simulation of the White Sea for developing the Russian Arctic area. Arctic: ecology and economy, 2018, no. 2 (30), pp. 45—55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-45-55. (In Russian).