

3.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕГО ЛЕДОВОГО РЕЖИМА АЗОВСКОГО МОРЯ

Л.В. Дашкевич, Л.Д. Немцева, С.В. Бердников

Аннотация. Выполнено математическое моделирование ледовитости, толщины льда и температуры воды Азовского моря для периода 1920–2016 гг. с помощью мультикомпарментальной балансовой гидрологической модели, модифицированной для выполнения расчетов с суточным шагом. В качестве внешних данных используются данные мониторинга на береговых метеостанциях. Проведено сравнение полученных результатов с оценками ледовитости и температуры воды по данным космоснимков MODIS спутников Terra и Aqua за 2006–2016 гг., толщины льда по данным наблюдений в портах. Показано, что модель может быть применена как для реанализа ледовитости в Азовском море, так и для целей оперативного прогнозирования. Приведена средняя многолетняя динамика ледовитости и толщины льда Азовского моря с 1920 г. по настоящее время. Отмечено смягчение ледовых условий в современный период. Средняя ледовитость Азовского моря в начале XXI в. составила 16 %, что почти в 2 раза меньше, чем в середине XX в. При этом результаты расчетов показывают, что в последнее десятилетие на фоне уменьшения ледовитости и сокращения продолжительности ледового периода средняя толщина льда снизилась незначительно.

Ключевые слова: ледовитость, Азовское море, спутниковые снимки MODIS (TERRA/AQUA), математические модели

Введение

Ледовый режим Азовского моря характеризуется существенной межгодовой и внутрисезонной изменчивостью. Резкие колебания ледовых условий, следующие за изменениями погоды над морем, объясняются географическим положением водоема, а также его мелководностью и невысокой соленостью. В зимний период наряду с постоянным ледовым режимом на акватории возможно неоднократное появление и исчезновение ледового покрова, чередование процессов таяния и замерзания. Это объясняет трудности в прогнозировании ледовых условий.

Регулярные наблюдения за ледовым режимом в дельте Дона организованы Южным научным центром РАН с 2005 г., также практически каждую зиму выполняются исследования акватории с ледокола «Капитан Демидов» [Матишов, 2008; Матишов и др., 2010, 2014 и др.]. В климатическом атласе [Atlas of climatic changes ... 2014] отражены многолетние данные о продолжительности ледового периода для отдельных гидрометеорологических пунктов.

В последние годы наряду с данными наземных наблюдений всё больший вес приобретает спутниковая информация, которая стала доступнее для пользователей и широко применяется, в том числе для верификации математиче-

ских моделей. Преимущество космических снимков в том, что они оперативно дают представление о пространственном распределении льда и температуры воды на всей акватории моря одновременно.

В работе [Бердников, 2006] предложен модельный подход к ретроспективному расчету гидрологического режима водоема, основанный на уравнениях водного, солевого и теплового балансов. Для 30 районов (боксов) моря (рис. 1) в многолетнем аспекте рассчитываются среднемесячные величины температуры и солёности воды, ледовитость (доля площади района, занятая льдом) и толщина льда в зависимости от задаваемых внешних факторов. В работе [Дашкевич, 2008] данная модель применена для изучения пространственно-временной изменчивости температурного режима Азовского моря в период 1920–2006 гг., а также рассчитаны элементы теплового баланса моря. Информация о толщине льда была представлена отрывочными сведениями, поэтому расчетные значения с данными наблюдений не сопоставлялись.

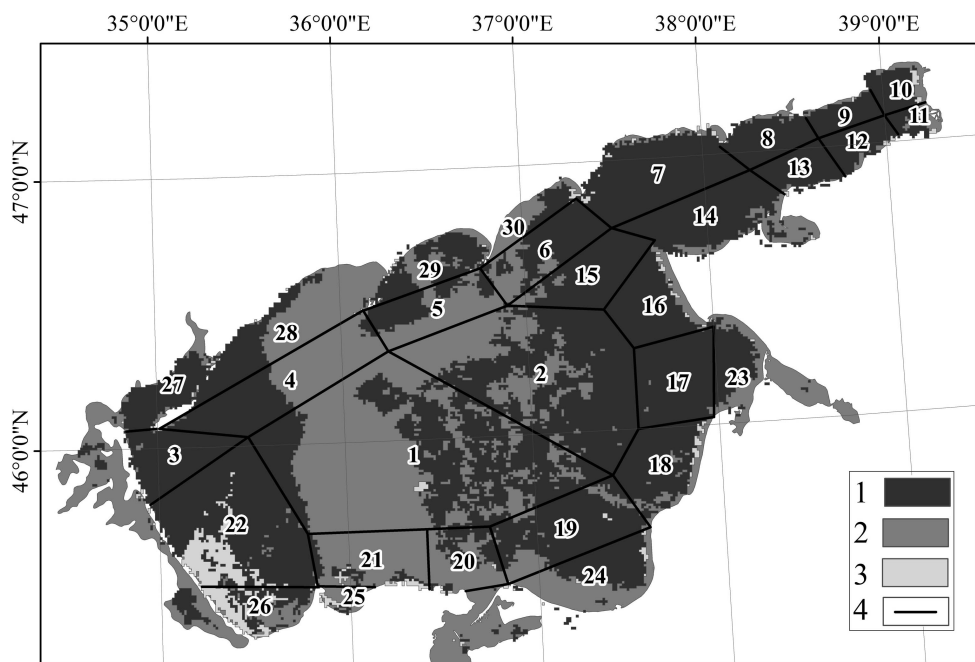


Рис. 1. Классифицированный снимок MYD29.A2012078.0915.005.2012078195003.hdf (съемка 18.03.2012): 1 – морской лед; 2 – открытая вода; 3 – облака; 4 – границы модельных районов

В проекте RFMEFI60414X0050 «Разработка компьютерной системы оперативного прогнозирования опасных природных явлений в бассейне, береговой зоне и акватории Азовского моря», выполненном в 2014–2015 гг. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития

научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», мультимедийная гидрологическая модель Азовского моря была модифицирована для целей прогнозирования ледового режима с суточным шагом по времени.

Проверка модели проводилась по результатам дешифрирования снимков акватории Азовского моря радиометром MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) со спутников Terra и Aqua в период 2006–2014 гг. Применяемый подход, описанный в работе [Дашкевич и др., 2015], будет рассмотрен ниже, поскольку был использован и в данной работе при обработке снимков 2015–2016 гг.

В настоящей статье представлено сравнение данных наблюдений, полученных при спутниковом мониторинге и на береговых постах, с результатами моделирования ледового режима и температуры вод Азовского моря.

Материалы и методы

Материалы космической съемки ледового режима. В работе применялись снимки второго уровня обработки MODIS/Terra Sea Ice Extent 5-Min L2 Swath 1 km (MOD29) и MODIS/Aqua Sea Ice Extent 5-Min L2 Swath 1 km (MYD29), первичные данные для которых поступают со спутниковых систем MODIS Terra и Aqua соответственно. Пространственное разрешение снимков составляет 1 км. Продукты MOD29/MYD29 включают в себя два вида расчетных данных: 1) классы морского льда, открытой воды, облаков, суши; 2) классы облаков, суши, значения температуры поверхности морской акватории. Источником данных снимков является сайт NASA – Earth Observing System Data Information System (EOSDIS), каталог Reverb/ECHO [reverb.echo.nasa.gov].

К числу преимуществ космических снимков MODIS для оценки ледовитости и температуры поверхности Азовского моря можно отнести широкоохватную съемку, наличие каналов среднего инфракрасного диапазона, возможность формирования и использования временных рядов спутниковых данных с шагом в одни сутки и чаще, а также их свободное распространение через множество электронных каталогов в сети Интернет.

Облачное небо препятствует приему спутником видимого света, отраженного от поверхности, что сокращает количество снимков MODIS, пригодных для дешифрирования морского льда. В зимний период в регионе исследования облака, как правило, заслоняют земную поверхность большую часть времени, поэтому, несмотря на большую частоту съемки, в результате отбора остается ограниченное число снимков.

Детектирование участков акватории с наличием морского льда по спутниковым снимкам MODIS основано на методике нормализованного разностного индекса снега NDSI (Normalized Difference Snow Index) [Algorithm theoretical basis ... 2001], расчет которого базируется на отражательной способности

льда: высокой – в видимом диапазоне и низкой – в инфракрасном (ИК). NDSI рассчитывается по данным MODIS Terra по формуле (1):

$$\text{NDSI} = (\text{band } 4 - \text{band } 6) / (\text{band } 4 + \text{band } 6), \quad (1)$$

где band 4 – значение коэффициента отражения (в у.е.) для 4-го спектрального канала с центром 0,55 мкм; band 6 – то же для 6-го спектрального канала с центром 1,6 мкм. Следует отметить, что существует различие между расчетными значениями индекса NDSI по данным MODIS Terra и Aqua. Оно связано с тем, что канал 6 у MODIS Terra является полностью функциональным, а у Aqua функционален лишь на 30 %. Для выделения морского льда по снимкам MODIS Aqua 6-й канал был заменен на 7-й (с центром 2,1 мкм).

Существуют ограничения применения индекса NDSI [Algorithm theoretical basis ... 2001], поэтому в алгоритм выделения морского льда по снимкам MODIS включены следующие пороговые условия: 1) значение NDSI в пикселе должно быть больше, чем 0,4; 2) коэффициент отражения в ближнем ИК >0,11; в зеленом канале >0,10. Если для пикселя на снимке выполняются эти условия, то он определяется как морской лед. На наличие морского льда анализировались только пиксели, которые с вероятностью 95 % и более не относятся к поверхности акватории, закрытой облаками.

Формула (2) расчета температуры морской поверхности (IST, град. К) одинакова для обоих инструментов – MODIS/Terra и MODIS/Aqua [nsidc.org]:

$$\text{IST} = a + b T_{31} + c (T_{31} - T_{32}) + d [(T_{31} - T_{32})(\sec \theta - 1)], \quad (2)$$

где T_{11} и T_{12} – яркостные температуры, измеренные со спутников в 31 и 32 каналах (град. К), θ – угол сканирования датчика, a , b , c , d – эмпирические коэффициенты для Северного полушария, меняются в зависимости от диапазона определяемых температур.

В ходе работы использовалось программное обеспечение ENVI и ArcGIS. В данной работе ENVI, предназначенный для всесторонней обработки космических снимков, был применен для конвертации снимков MODIS из формата HDF-EOS в универсальный и более удобный для работы в ArcGIS формат GeoTiff, а также для преобразования снимков в единую проекцию WGS-84, 36 Z. Для расчета по снимкам площади акватории с ледовым покровом применялся программный комплекс ArcGIS. Для оптимизации процесса обработки большого архива снимков средствами приложения ArcGIS Model Builder была разработана процедура автоматизированного расчета площадей выделенных классов [Дашкевич и др., 2015]. Дешифрирование морского ледового покрова по космическим снимкам MODIS можно проиллюстрировать с помощью фрагмента снимка MODIS Aqua второго уровня обработки, который включает в себя акваторию Азовского моря (рис. 1). Как видно на рисунке, большая часть моря покрыта льдом, который на дешифрированном снимке выделен черным цветом. Следует отметить, что это один из немногих снимков, снятый при практически безоблачной погоде.

Всего было обработано более 500 снимков. Так как в зимние месяцы небо над Азовским морем часто закрыто облаками, спутниковые данные очень малочисленны. Использовались снимки с покрытием акватории облаками менее 25 %, поэтому после отсева снимков со значительной облачностью для сравнения было оставлено 265 снимков.

Моделирование гидрологического режима Азовского моря. В качестве внешних факторов при моделировании гидрологического режима используются суммарная солнечная радиация, температура и относительная влажность воздуха, облачность, скорость ветра, температура речных и черноморских вод. В основу модели ледового режима положен кибернетический подход: процессы таяния и замерзания льда сверху, снизу или сбоку реализованы в виде последовательно выполняемых шагов общего алгоритма расчета толщины льда и ледовитости [Бердников, 2006]. Источником данных наблюдений за последние 10 лет послужил российский сайт [gr5.ru], учрежденный компанией ООО «Расписание Погоды», где в свободном доступе хранятся регулярно пополняемые архивы данных натурных наблюдений наземных гидрометеорологических станций. Верификацию модели и сравнение полученных результатов с натурными наблюдениями проводили на основе баз данных [Atlas of climatic changes ... 2014; Climatic atlas ... 2008] за почти столетний период, космических снимков MODIS Terra и Aqua за 2006–2016 гг.; данных Гидрометцентра России [hmc.meteorf.ru] за 2008–2016 гг.

Результаты и обсуждение

Ледовитость. В ходе проделанной работы было сделано сравнение оценок площади ледового покрова по результатам дешифрирования снимков MODIS (Terra/Aqua) для зимних периодов 2005/2006–2015/2016 гг. и результатам модельных расчетов (рис. 2 и 3). Для зим 2014/2015 и 2015/2016 гг. проведено сравнение ледовитости не только для акватории в целом, но и по отдельным районам (рис. 2). Расчетная ледовитость в целом соответствует данным спутникового мониторинга (с поправкой на облачность), модель лучше воспроизводит пространственное развитие ледового покрова, хуже – динамику освоения моря ото льда. Возможно, это связано с отсутствием учета в модели дрейфа льда под действием течений. Как видно на рисунках 2 и 3, модель адекватно рассчитывает внутрисезонную и межгодовую динамику ледовитости Азовского моря. Графики, построенные по спутниковым данным и модельным расчетам, имеют общие тенденции временной изменчивости ледовитости.

Рассчитанная с помощью модели средняя за зимний сезон ледовитость Азовского моря за 1920–2016 гг. (рис. 3) хорошо согласуется с оценками ледовитости по данным наблюдений для периода 1950–1977 гг., приведенными в работе [Гидрометеорологические условия ... 1986], – коэффициент корреляции равен 0,92. На основе спутниковых снимков ледовой обстановки в 2005–2016 гг. также была рассчитана средняя ледовитость моря.

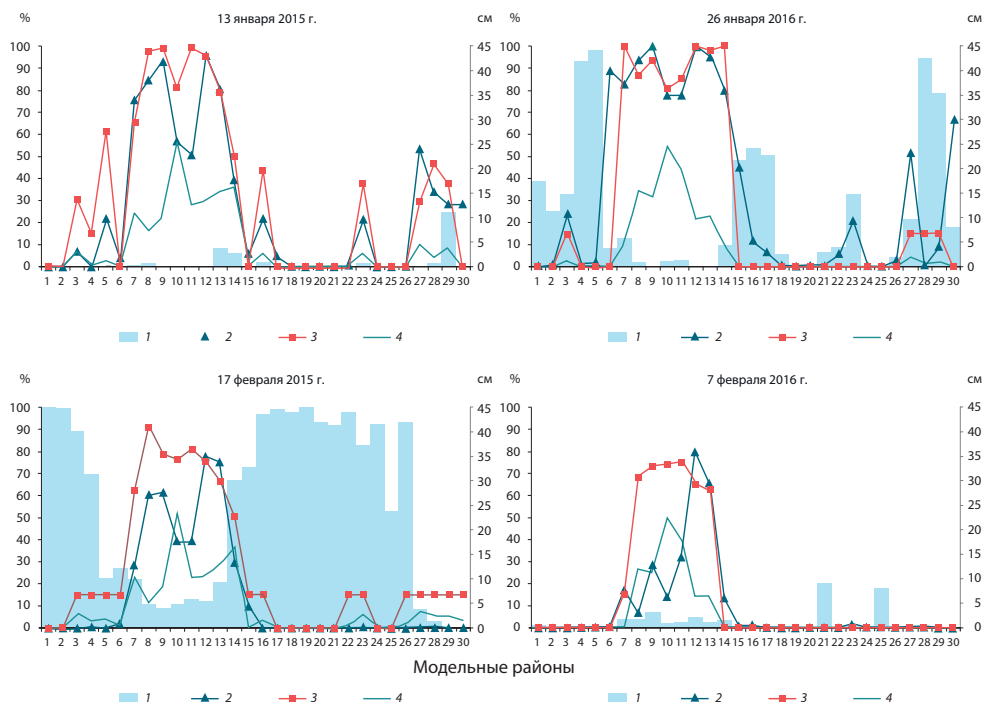


Рис. 2. Пространственное распределение ледовитости и толщины льда по модельным районам Азовского моря: 1 – облачность, %; 2 – оценка ледовитости по снимкам, %; 3 – расчет ледовитости, %; 4 – расчет толщины льда, см

Данные усреднялись подекадно, помесечно и далее за зимний сезон в целом аналогично методике, примененной в работе [Гидрометеорологические условия ... 1986]. При их сопоставлении с расчетными значениями ледовитости (рис. 3) разница не превышает 5 %, коэффициент корреляции 0,94. Для многих лет оценки средней ледовитости Азовского моря по годам отсутствуют, поэтому результаты моделирования можно рассматривать как альтернативу таким оценкам. Как по результатам расчетов, так и по данным наблюдений, с конца XX в. общая ледовитость моря в среднем составляет 16 % – она меньше, чем в середине прошлого века, когда ледовитость колебалась возле отметки 30 %.

Толщина льда. Для сравнения модельной толщины льда использовались данные с картосхем Гидрометцентра России о ледовых условиях в Азовском море [hmc.meteorf.ru]. На рисунках 2–4 приведены расчетные значения толщины льда в сравнении с результатами наблюдений Гидрометцентра России в береговой зоне. За период 2005/2006–2015/2016 гг. наибольшая ледовитость (и толщина льда) Азовского моря наблюдалась в суровые зимы 2005/2006 и 2011/2012 гг., наименьшая – в мягкие зимы 2006/2007 и 2015/2016 гг.

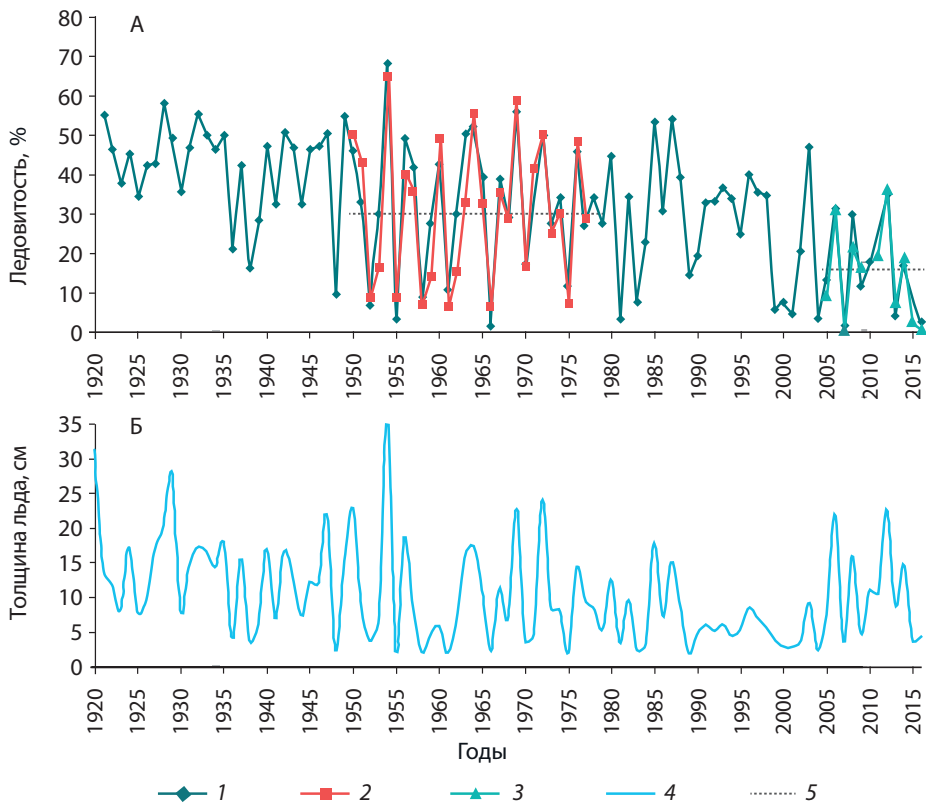


Рис. 3. Многолетняя динамика ледовитости (А) и толщины льда (Б) в Азовском море: 1 – результаты модельного расчета ледовитости; 2 – ледовитость (по материалам [Гидрометеорологические условия ... 1986]); 3 – оценка ледовитости по спутниковым снимкам MODIS (Terra/Aqua); 4 – средняя толщина льда за ноябрь – март, результаты расчета; 5 – средняя ледовитость за период

На рисунке 3Б приведена рассчитанная с помощью модели средняя за зимний сезон (ноябрь – март) толщина льда Азовского моря для периода 1920–2016 гг., которая была оценена путем деления объема льда на площадь моря, покрытую льдом. Как можно видеть на рисунке 3, в XXI в. при наблюдаемом уменьшении среднегодовой ледовитости и продолжительности ледового периода средняя толщина льда снизилась незначительно. Суровые зимы 2005/2006 и 2011/2012 гг. значительно менее ледовиты в годовом исчислении, чем зимы начала – середины XX в. при сравнимой средней толщине льда. Вероятно, это является примером внутривековых климатических колебаний [Матишов, 2008; Матишов и др., 2010, 2014 и др.].

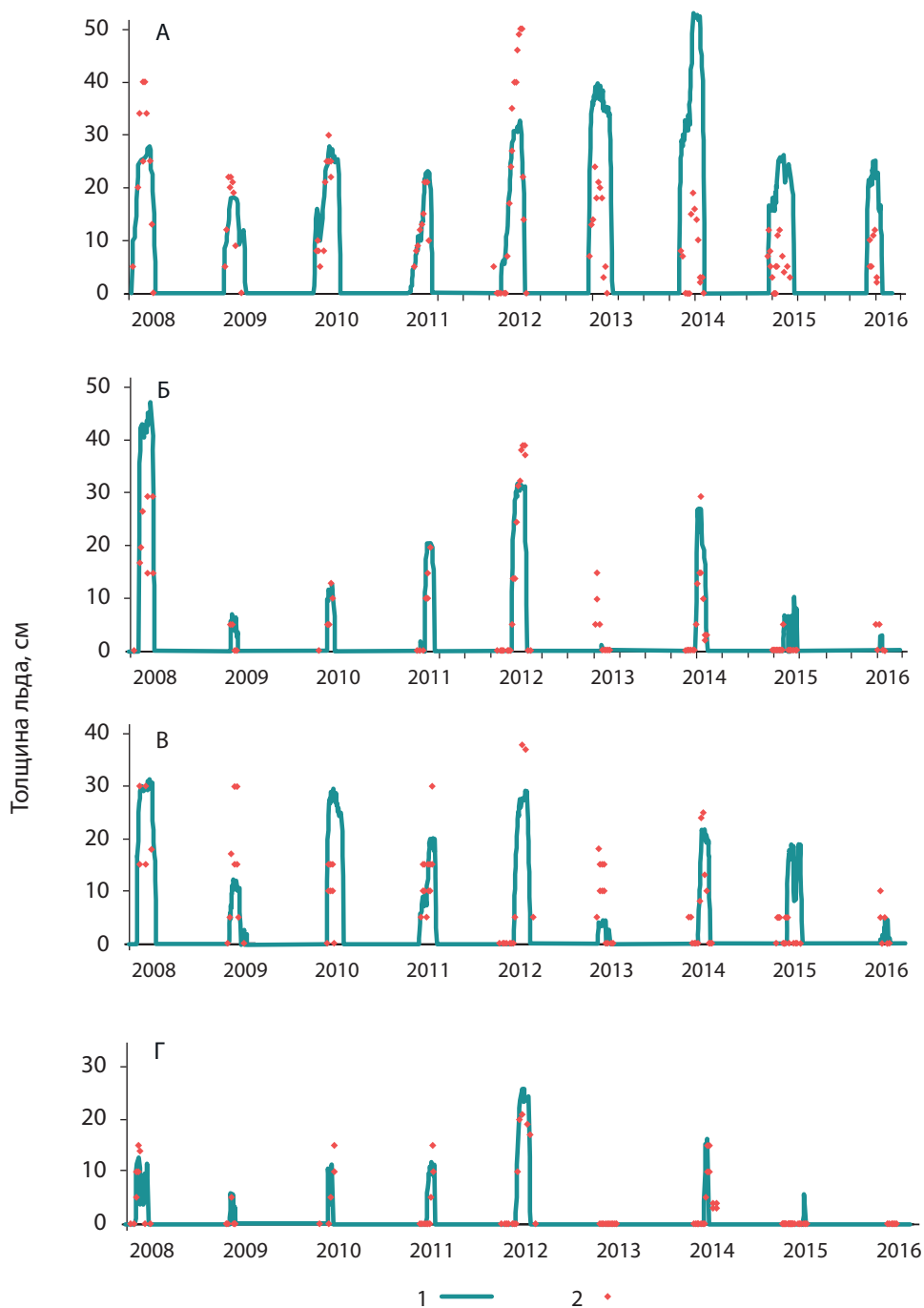


Рис. 4. Динамика толщины льда Азовского моря (Таганрог (А), Геническ (Б), Ейск (В), Казантип (Г)): 1 – результаты моделирования, 2 – толщина льда (по данным [hmc.meteorf.ru])

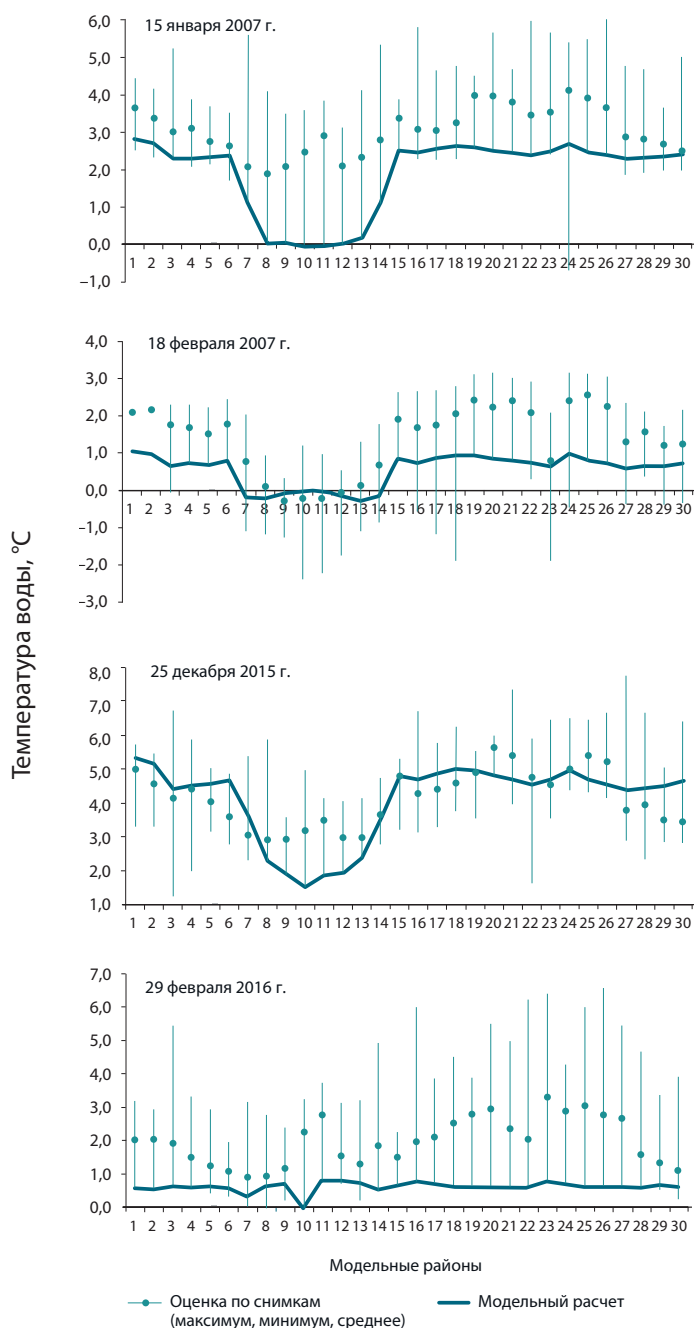


Рис. 5. Пространственное распределение температуры воды (°C) по модельным районам Азовского моря

Температура воды. С помощью модели была рассчитана температура воды Азовского моря и проведено сравнение с данными по датчику MODIS (Terra/Aqua) для зимних сезонов 2006–2016 гг. Сравнение проводилось для безледных периодов зим, поскольку продукты MODIS (MOD29/MYD29) включают в себя расчетные данные температур поверхности всей площади акватории, включая морской лед и открытую воду. На рисунке 5 приведено сравнение для теплых зим 2006/2007 и 2015/2016 гг. по районам в безледный период. Отрицательные температуры поверхности на графике, вероятно, показывают начало ледообразования при еще не отмечаемом ледовом покрове.

Заключение

В результате настоящей работы на основе данных спутниковых измерений была проведена проверка адекватности расчетов временной и пространственной динамики ледового режима Азовского моря с помощью мультикомпарментальной математической модели. Сопоставление данных дистанционного зондирования и результатов моделирования позволяет говорить о репрезентативности модели и возможности ее использования для ретроспективного анализа и краткосрочного прогноза. В многолетней изменчивости ледового режима Азовского моря сделан вывод о смягчении ледовых условий в XXI в. относительно начала – середины XX в.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 01201363188.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ И ИСТОЧНИКОВ

Бердников С.В. Моделирование крупномасштабных изменений океанологических характеристик экосистемы Азовского моря // Закономерности экосистемных процессов в Азовском море / Г.Г. Матишов, Ю.М. Гаргопа, С.В. Бердников, С.Л. Дженюк; под ред. Г.Г. Матишова. М.: Наука, 2006. С. 137–229.

Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 3. Азовское море. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 218 с.

Дашкевич Л.В. Анализ многолетней изменчивости температурного режима вод открытой части Азовского моря с использованием геоинформационных технологий и математического моделирования: автореф. дис. ... канд. геогр. наук (спец. 25.00.28). Мурманск, 2008. 26 с.

Дашкевич Л.В., Немцева Л.Д., Бердников С.В. Ледовитость Азовского моря по спутниковым снимкам MODIS (Terra / Aqua) и результатам математического моделирования // Информация и Космос. 2015. № 4. С. 100–105.

Матишов Г.Г. Влияние изменчивости климатического и ледового режимов на суходождение // Вестник Российской академии наук. 2008. Т. 78. № 10. С. 896–902.

Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Гаргопа Ю.М., Дашкевич Л.В. Замерзание Азовского моря и климат в начале XXI века // Вестник Южного научного центра. 2010. Т. 6. № 1. С. 33–40.

Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В., Чикина Л.Г. Ледовый режим Азовского моря и климат в начале XXI века // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457. № 5. С. 603–607.

Atlas of climatic changes in nine large marine ecosystems of the northern hemisphere (1827–2013) / G.G. Matishov, S.V. Berdnikov, A.P. Zhichkin, S.L. Dzhenyuk, I.V. Smolyar, V.V. Kulygin, N.A. Yaitskaya, V.V. Povazhniy, I.V. Sheverdyayev, S.V. Kumpan, I.A. Tretyakova, A.E. Tsygankova, N.N. D'yakov, V.V. Fomin, D.N. Klochkov, B.M. Shatohin, V.V. Plotnikov, N.M. Vakulskaya, V.A. Luchin, A.A. Kruts. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 2014. 131 p. (Series: NOAA Atlas NESDIS 78).

Climatic atlas of the Sea of Azov 2008 / G. Matishov, D. Matishov, Yu. Gargopa, L. Dashkevich, S. Berdnikov, V. Kulygin, O. Arkhipova, A. Chikin, I. Shabas, O. Baranova, I. Smolyar; G. Matishov, S. Levitus (Eds.). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 2008. 148 p. (Series: NOAA Atlas NESDIS 65).

Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms / D.K. Hall, G.A. Riggs, V.V. Salomonson, J.S. Barton, K. Casey, J.Y.L. Chien, N.E. DiGirolamo, A.G. Klein, H.W. Powell, A.B. Tait. NASA GSFC. 2001. 45 p.

hmc.meteorf.ru: сайт Гидрометцентра России – URL: [http:// hmc.meteorf.ru/sea/](http://hmc.meteorf.ru/sea/), свободный.

nsidc.org: National Snow & Ice Data Center. URL: http://nsidc.org/data/docs/daac/modis_v5/mod29_modis_terra_seaice_5min_swath_1km.gd.html, свободный.

reverb.echo.nasa.gov: Earth Observing System Data Information System (EOSDIS), каталог Reverb/ECHO. URL: <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>, свободный.

rp5.ru: Расписание погоды. URL: <http://rp5.ru>, свободный.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дашкевич Людмила Владимировна – к.г.н., в.н.с. ЮНЦ РАН; ldashkev@ssc-ras.ru

Немцева Лидия Дмитриевна – к.г.н., н.с. ЮНЦ РАН; karpinskaja@ssc-ras.ru

Бердников Сергей Владимирович – д.г.н., председатель ЮНЦ РАН; berdnikov@ssc-ras.ru