

## Ледовитость Азовского моря по спутниковым снимкам MODIS (Terra/Aqua) и результатам математического моделирования

### Ice cover of the Sea of Azov by satellite images of MODIS (Terra/Aqua) and by the results of mathematical modeling

#### Дашкевич / Dashkevich L.

Людмила Владимировна

(ldashkev@ssc-ras.ru)

кандидат географических наук.

ФГБУН Институт аридных зон (ИАЗ)

Южного научного центра (ЮНЦ) РАН,

старший научный сотрудник.

г. Ростов-на-Дону

#### Бердников / Berdnikov S.

Сергей Владимирович

(berdnikov@ssc-ras.ru)

доктор географических наук, профессор.

ЮНЦ РАН, заместитель Председателя.

г. Ростов-на-Дону

#### Немцева / Nemtseva L.

Лидия Дмитриевна

(karpinskaja@ssc-ras.ru)

кандидат географических наук.

ИАЗ ЮНЦ РАН,

научный сотрудник.

г. Ростов-на-Дону

**Ключевые слова:** ледовитость – ice cover; Азовское море – Sea of Azov; математические модели – mathematical models; обработка снимков – processing satellite images; MODIS Terra/Aqua.

Методами математического моделирования выполнена оценка ледовитости и толщины льда Азовского моря за период 1920–2014 гг. Верификация модели основывается на данных дистанционного зондирования, литературных источниках и результатах натурных наблюдений. Проведено сравнение полученных результатов с данными космоснимков MODIS спутников Terra и Aqua за 2006–2014 гг. Показано, что комплексное использование спутниковой информации и математического моделирования является перспективным для оперативного прогноза ледового режима в регионе.

Evaluation of the ice cover and thickness ice of the Azov Sea is made by means of mathematical modeling for the period 1920–2014 years. Verification of the mathematical model was carried out on remote sensing data, on published literature and on the results of field observations. Comparison of the results of mathematical modeling carried out with the data of satellite images satellites Terra and Aqua for the years 2006–2014. It is shown that integrated use of satellite data and mathematical modeling is promising for operational forecasting of the ice situation in the region.

Ледовые условия Азовского моря, как в течение ледового сезона, так и от года к году, характеризуются высокой изменчивостью. Это объясняется географическим расположением рассматриваемого водоема на границе замерзающих и безледных морей умеренных широт, а также мелководностью и низкой соленостью, что приводит к достаточно резким колебаниям в связи с изменчивостью погодных условий над морем. В зимний период наряду с постоянным ледовым режимом возможно неоднократное появление и исчезновение льда, чередование процессов таяния и замерзания. В силу этого оперативная оценка и прогноз ледовых условий являются актуальной задачей.

Многолетнее изменение ледового режима Азовского моря и его состояние в современный период по данным наблюдений регулярно освещается в работах ЮНЦ и ИАЗ ЮНЦ РАН [1–4]. Однако помимо натурных наблюдений, все больший вес приобретают спутниковая информация, которая в последние годы стала более доступной для пользователей, и методы математического моделирования, используемые для прогнозирования ледового режима.

При верификации математических моделей обычно используют данные наблюдений на гидрометеорологических станциях и результаты ледовых экспедиций. Преимущество космических снимков над данными наземных наблюдений в том, что они оперативно

дают представление о пространственном распределении льда на всей акватории моря одновременно. По данным спутникового альтиметра с достаточной точностью определяется высота поверхности льда над уровнем моря, которую исследователи применяют для расчета толщины льда.

В данной работе с помощью методов математического моделирования проводится оценка динамики ледового покрова в Азовском море за почти столетний период. Верификация модели основывается на данных дистанционного зондирования, литературных источниках и результатах натурных наблюдений из базы данных ИАЗ и ЮНЦ РАН.

Предлагаемый подход реализован в проекте RFMEFI60414X0050 «Разработка компьютерной системы оперативного прогнозирования опасных природных явлений в бассейне, береговой зоне и акватории Азовского моря», выполняемом в 2014–2015 гг. в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы".

## Материалы и методы

В работах [5, 6] был предложен модельный подход ретроспективного и прогнозного расчета ледового режима водоема, основанный на уравнениях водного, солевого и теплового балансов. Динамика льда описывается двумя макрохарактеристиками – толщиной и ледовитостью (доля площади района, занятая льдом). Входными данными для модели расчета ледового режима Азовского моря стали данные из исторической базы данных ИАЗ и ЮНЦ РАН [4, 7]. Для модельного расчета в качестве внешних факторов используются суммарная солнечная радиация, температура и относительная влажность воздуха, облачность, скорость ветра, температура речных и черноморских вод. Источником данных наблюдений за последние 10 лет послужил российский сайт [8], учрежденный компанией ООО "Расписание Погоды", где хранятся в свободном доступе регулярно пополняемые архивы данных натурных наблюдений наземных гидрометеорологических станций. В основу модели ледового режима положен кибернетический подход, когда процессы таяния или замерзания льда сверху, снизу или сбоку реализованы в виде последовательно выполняемых шагов общего алгоритма расчета толщины льда и ледовитости [5, 6].

Одновременно с характеристиками температурного и ледового режима рассчитываются элементы теплового баланса: поглощенная радиация, эффективное излучение, радиационный баланс водной поверхности, затраты тепла на испарение, контактный теплообмен.

Верификацию модели ледового режима Азовского моря, сравнение полученных результатов с натурными и литературными данными проводили на основе [4, 7] за почти столетний период и данными дистанционного зондирования со спутников Terra и Aqua за 2006–2014 гг.

*Обработка данных дистанционного зондирования.* Материалами космической съемки, примененными в данной работе, являются данные MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) со спутников Terra и Aqua. По ним определялись площади ледового покрова на акватории Азовского моря. В работе применялись продукты уровня обработки 2 (level-2): 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 MODIS Aqua, соответственно). Пространственное разрешение снимков составляет 1 км.

Источником снимков MODIS уровня-2 (MOD29, MYD29) является сайт, учрежденный NASA, Earth Observing System Data Information System (EOSDIS), каталог Reverb/ECHO [9]. При выборе снимков MODIS в каталоге задавалась область, покрывающая всю акваторию Азовского моря. Она ограничивается 48° с.ш. на севере, 45° с.ш. на юге, 34° в.д. на западе и 40° в.д. на востоке (рис. 1).

К числу преимуществ космических снимков MODIS для оценки ледовитости Азовского моря можно отнести широкоохватность съемки, 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.

К отрицательным свойствам снимков оптического датчика MODIS относится возможность съемки в видимом спектральном диапазоне для распознавания морского льда только в дневное время. Кроме этого, облачное небо препятствует приему спутником видимого света, отраженного от поверхности, даже маломощные облака блокируют все оптическое излучение в видимом диапазоне. В зимний период в регионе исследования облака, как правило, заслоняют земную поверхность большую часть времени. Все эти факторы сокращают количество спутниковых снимков MODIS, пригодных для дешифрирования морского льда, поэтому, несмотря на большую частоту съемки, в результате отбора остается ограниченное число снимков. К сожалению, снимки, полученные с помощью оптического датчика MODIS, не дают информацию о толщине льда (для этого необходимы данные спутникового альтиметра), поэтому не было возможности сравнить результаты модельного расчета и спутниковые данные.

Трудности дешифрирования ледового покрова водоемов по космическим снимкам, снятым в видимом диапазоне электромагнитного спектра, связаны с проблемой разделения изображений облаков и снежно-ледовых образований. Обычно их разделяют по структуре и рисунку изображений. Однако более эффективный путь – это использование снимков среднего инфракрасного диапазона, особенно снятых в областях 1.55–1.75 и 2.10–2.35 мкм, где яркости облаков и снега резко отличаются [10].

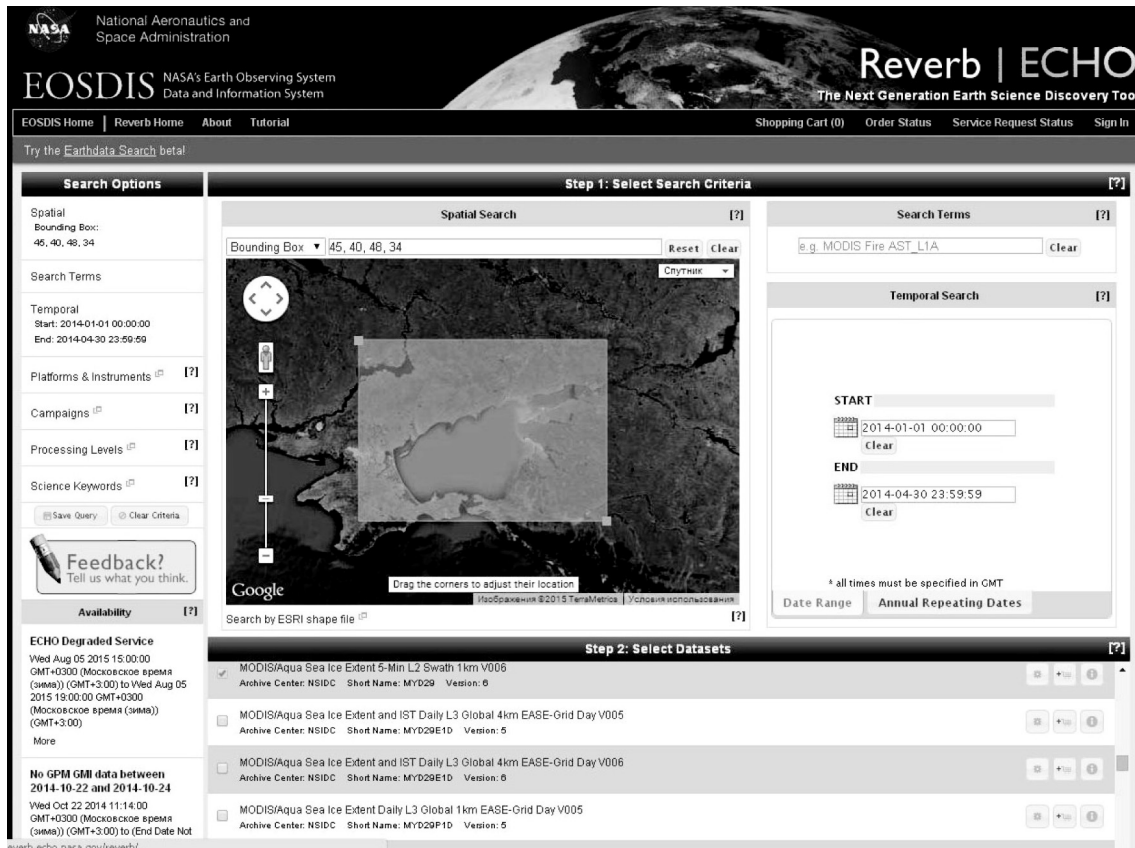


Рис. 1. Выбор продуктов MODIS Terra/Aqua на сайте EOSDIS

Детектирование участков акватории с наличием морского льда по спутниковым снимкам MODIS основано на методике нормализованного разностного индекса снега NDSI (Normalized Difference Snow Index) [11, 12, 13]. Расчет индекса основан на отражательной способности льда: высокой – в видимом диапазоне и низкой – в ближнем инфракрасном (ИК). NDSI рассчитывается по данным MODIS Terra с применением 4 (0.55 мкм) и 6 (1.6 мкм) каналов по формуле:

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

где band 4 – 4 канал (0.55 мкм), band 6 – 6 канал (1.6 мкм).

Следует отметить, что существует различие между расчетами индекса NDSI по данным MODIS Terra и MODIS Aqua. Оно связано с тем, что канал 6 у MODIS Terra является полностью функциональным, а тот же канал у MODIS Aqua – функционален лишь на 30%. Поэтому для выделения морского льда по снимкам MODIS Aqua 6 канал был заменен на 7 (2.1 мкм), а NDSI рассчитывался по следующей формуле:

$$NDSI = (band\ 4 - band\ 7) / (band\ 4 + band\ 7), \quad (2)$$

где band 4 – 4 канал (0.55 мкм), band 7 – 7 канал (2.1 мкм).

В документации к снимкам MODIS [12] указано, что существуют некоторые ограничения применения индекса NDSI, т.к. на индексных изображениях, получаемых в результате его расчета, снег/лед иногда можно спутать с водой. Поэтому необходимо пороговое разделение пикселей относящихся к классам «чистой поверхности», облаков и снежного/ледового покрова.

В связи с этим в алгоритм выделения морского льда по снимкам MODIS были заложены пороговые условия: 1) значение NDSI в пикселе должно быть больше, чем 0.4; 2) коэффициент отражения в видимом диапазоне (2 канал) > 0.11; в 1 канале > 0.10. Если пиксель на снимке выдерживает эти условия, то он определяется как морской лед. Кроме того, только пиксели, которые с вероятностью 95% и более не относятся к поверхности акватории закрытой облаками, анализируются на предмет наличия морского льда [14].

В ходе работы использовалось программное обеспечение ENVI и ArcGIS. Программный комплекс ENVI предназначен для всесторонней обработки космических снимков. В данной работе ENVI был применен для конвертации снимков MODIS из формата HDF-EOS в универсальный и более удобный для работы в ArcGIS формат Geo Tiff, а также для преобразования снимков в единую проекцию WGS-84, 36 Z.

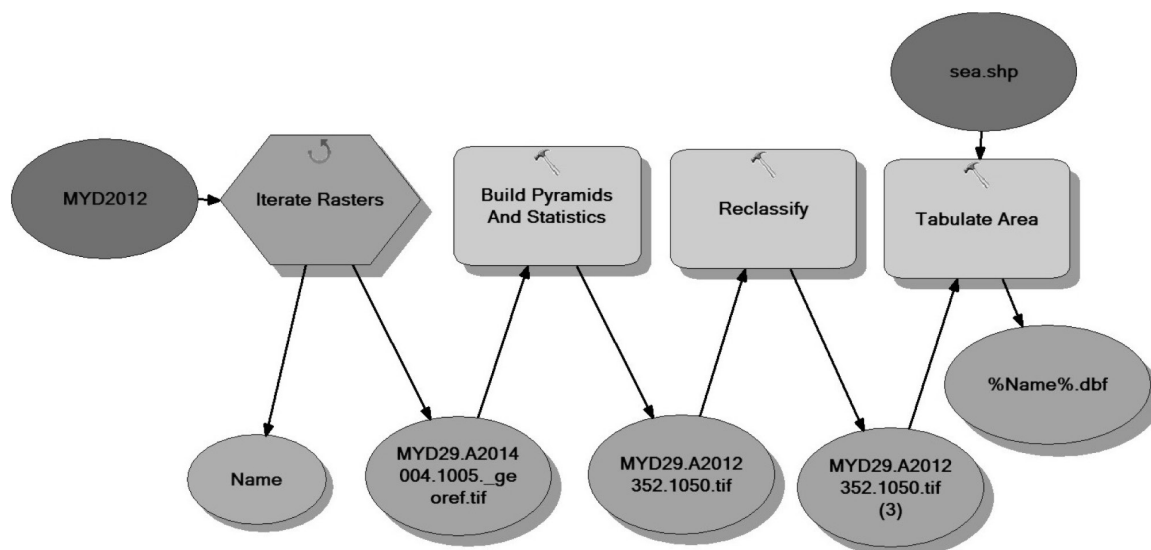


Рис. 2. Модель расчета площадей классов по снимкам MOD29/MYD29

Для подсчета по снимкам площади акватории с ледовым покровом применялся программный комплекс ArcGIS. Для того чтобы оптимизировать процесс обработки большого архива снимков средствами приложения ArcGIS Model Builder была разработана процедура автоматизированного расчета площадей выделенных классов (рис. 2). Использование программного обеспечения Model Builder позволяет значительно сократить затраты времени на подготовку данных для дальнейшего анализа.

Модель включает в себя инструменты: Build Pyramids and Statistics, Reclassify, Tabulate Area. Функция Iterate Rasters служит для потоковой обработки однотипных растров с помощью одних и тех же инструментов. Входными данными служат продукты MODIS MOD29/MYD29 в формате Geo Tiff. На первом этапе с помощью инструмента Build Pyramids and Statistics рассчитываются все необходимые параметры снимков для дальнейшей работы в ArcGIS. На втором этапе применяется инструмент Reclassify, с помощью которого производится повторная классификация снимка с получением на выходе растровых изображений, адаптированных к расчету в ArcGIS площадей выделенных классов. На последнем этапе применяется инструмент Tabulate Area, который рассчитывает площади классов. На выходе мы получаем результаты расчетов в виде таблиц в формате dbf.

### Результаты и обсуждение

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. 3). Как видно на рисунке, большая часть акватории Азовского моря покрыта льдом, который на дешифрированном снимке выделен черным цветом.

В ходе проделанной работы было сделано сравнение данных модельных расчетов и оценок площади ледового покрова по результатам дешифрирования снимков MODIS (Terra/Aqua) для девяти зимних периодов 2005/06–2013/14 гг., результаты представлены на рис. 4. Всего было обработано 454 снимка. Так как в зимние месяцы небо над Азовским морем часто закрыто облаками, спутниковые данные очень малочисленны, для адекватного сравнения использовались только те снимки, где покрытие акватории облаками составляло менее 25%, поэтому после отсева снимков со значительной облачностью для сравнения был оставлен 241 снимок.

Как видно на рис. 4, модель адекватно рассчитывает внутригодовую динамику ледовитости Азовского моря. Графики, построенные по спутниковым данным и модельным расчетам, имеют общие тенденции временной изменчивости ледовитости. На рис. 4 также приведены результаты модельного расчета средней толщины льда по акватории. За период 2005/06–2013/14 гг. наибольшая ледовитость (и средняя толщина льда) Азовского моря наблюдалась в суровые зимы 2005/06 и 2011/2012 гг., наименьшая – в 2006/07 и 2012/13 гг.

Рассчитанная с помощью модели средняя ледовитость Азовского моря за период 1920–2015 гг. (рис. 5) хорошо согласуется с данными, приведенными в работе [15] (коэффициент корреляции равен 0.91). Современные оценки средней ледовитости Азовского моря по годам отсутствуют, поэтому данные модельного расчета можно рассматривать как альтернативу таким оценкам.

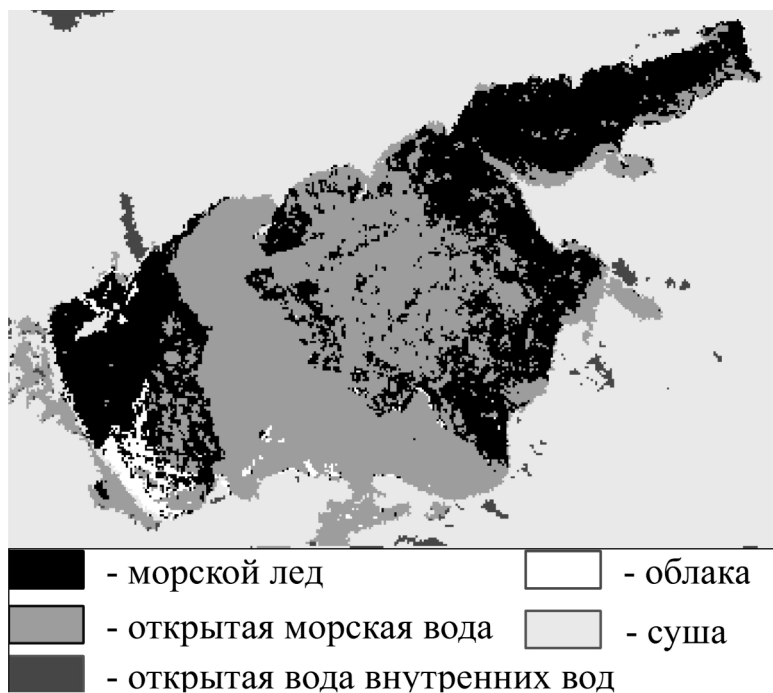


Рис. 3. Классифицированный снимок  
 MYD29.A2012079.1005.005.2012080151952.hdf (дата съемки 19.03.2012 г.)

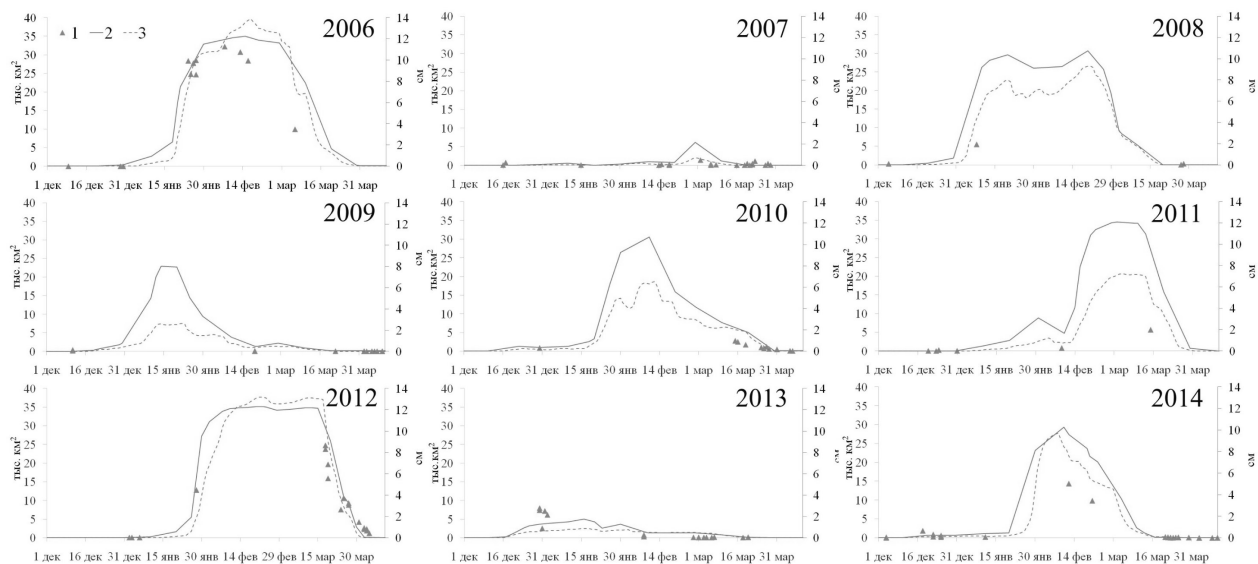


Рис. 4. Динамика ледовитости Азовского моря по результатам оценки по снимкам MODIS (Terra/Aqua) (1) и моделирования (2); 3 – толщина льда (см, ось справа) по результатам расчетов

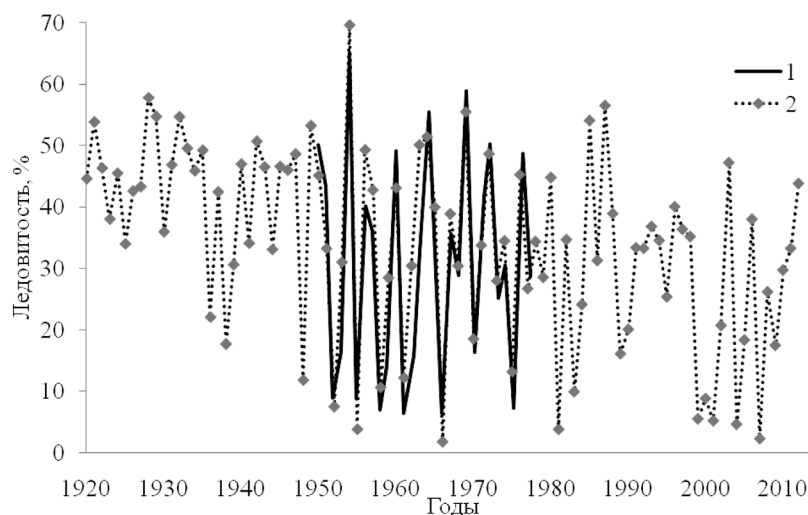


Рис. 5. Многолетняя динамика ледовитости в Азовском море: 1 – по материалам [15]; 2 – результаты модельного расчета

## Заключение

Сопоставление данных спутниковых измерений и результатов моделирования ледового режима Азовского моря позволяет говорить о репрезентативности модели. Комплексное использование спутниковой информации и математического моделирования является перспективным для оперативного прогноза ледовой ситуации в регионе. Представляется целесообразным в дальнейшем провести анализ межгодовой изменчивости ледовитости Азовского моря на основе большего временного ряда снимков, а также провести сравнение результатов моделирования толщины льда Азовского моря с оценками по данным спутникового альтиметра.

## Литература

1. Матишов, Г. Г. Влияние изменчивости климатического и ледового режимов на судоходство / Г.Г. Матишов // Вестник Российской академии наук. – 2008. – Т. 78. – № 10. – С. 896–902.
2. Замерзание Азовского моря и климат в начале XXI века / Г.Г. Матишов [и др.] // Вестник Южного научного центра РАН. – 2010. – Т. 6. – № 1. – С. 33–40.
3. Ледовый режим Азовского моря и климат в начале XXI века / Г.Г. Матишов [и др.] // Доклады академии наук. – 2014. – Т. 457. – № 5. – С. 603–607.
4. Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013) / G.G. Matishov [et al.]. – Reading: Matishov G.G., Sherman K., Levitus S. (Eds.) – NOAA Atlas NESDIS 78, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2014. – 131 p.
5. Бердников, С. В. Разработка и применение компарментальных моделей для изучения пространственных характеристик морских экологических систем : дис. ... докт. географ. наук : 25.00.28 : защищена 25.02.2004 : утв. 11.06.2004 / С.В. Бердников; ММБИ. – Мурманск, 2004. – 335 с.

6. Моделирование крупномасштабных изменений океанологических характеристик экосистемы Азовского моря / Г.Г. Матишов [и др.] // Закономерности экосистемных процессов в Азовском море / под ред. Г.Г. Матишова. – М.: Наука, 2006. – С. 137–229.

7. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008. / G. Matishov [et al.] Reading: G. Matishov, S. Levitus, Eds. – NOAA Atlas NESDIS 65, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2008. – 148 p.

8. rp5.ru: Расписание погоды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rp5.ru>, свободный. – Загл. с экрана.

9. reverb.echo.nasa.gov: Earth Observing System Data Information System (EOSDIS), каталог Reverb/ECHO [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>, свободный. – Загл. с экрана.

10. Swain, Ph. Remote Sensing: The Quantitative Approach / Philip H. Swain and Shirley M. Davis, Eds. – New York: McGraw-Hill, 1978. – 396 p.

11. Hall, D. K. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data / D.K. Hall, G.A. Riggs, V.V. Salomonson // Remote sensing of Environment. – 1995. – 54(2). – P. 127–140.

12. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms / D.K. Hall [et al.]. – NASA GSFC. 2001. – 45 p.

13. Hall, D. K. Normalized-Difference Snow Index (NDSI). in Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers, Eds / D.K. Hall, G.A. Riggs. Reading: V.P. Singh, P. Singh, and U.K. Haritashya. Springer. – 2014. – P. 779–780.

14. Riggs, G. Snow Mapping with the MODIS Aqua Instrument / G. Riggs, D.K. Hall. // 61st EASTERN SNOW CONFERENCE Portland, Maine, USA 2004. – P. 81–84.

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