ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА АЗОВСКОГО МОРЯ

А.А. Магаева^{1,2}, Н.А. Яицкая^{1,3}

¹ФИЦ Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

²Институт Наук о земле ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия

³Сочинский научно-исследовательский центр РАН, Сочи, Россия

a.magaeva@mail.ru, yaitskayan@gmail.com

Аннотация. В статье представлен анализ результатов реанализа OSI-450 как альтернативного источника данных для исследования ледяного покрова Азовского моря. С помощью лицензионного программного обеспечения ArcGIS 10.* была создана модель для обработки данных. Показано, что данные реанализа OSI-450 занижают значения ледовитости за сезон, но в целом, воспроизводит многолетнюю динамику ледяного покрова за рассматриваемый период.

Ключевые слова: ледяной покров, реанализ, ГИС, Азовское море.

Ледяной покров является одним из наиболее важных факторов, определяющих состояние поверхности моря. Исследование и прогнозирование его параметров представляет не только научный, но и большой практический интерес для морских отраслей экономики. Влияние льда на плавание судов в замерзающих морях намного превышает суммарный эффект воздействия всех остальных природных явлений. Даже на частично замерзающих морях, к которым относятся неарктические моря (Белое, Балтийское, Черное, Азовское, Каспийское, Японское, Охотское, Берингово), ледовая обстановка бывает сложной и требует ледокольной проводки судов и специализированного гидрометеорологического и ледового обслуживания [1].

Много лет назад не представлялось возможным вести непрерывные наблюдения за ледяным покровом ввиду трудоемкости данного процесса – чтобы охватить всю акваторию моря необходимо было выполнять авиаразведку, которая зачастую осложнялась погодными условиями. В последние десятилетия это стало возможным благодаря спутниковым наблюдениям. Одним из известных спутниковых массивов является продукция Национального центра данных по снегу и льду, США (<https://nsidc.org/>), а также база данных Национальной администрации США по океану и атмосфере (NOAA). В 2014 г. ЮНЦ РАН совместно с NOAA разработали Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах северного полушария (1987–2013) [2,3]. В рамках данной работы проводился сбор данных о ледяном покрове северных морей России – Баренцевом, Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском, Чукотском и Беринговом морях, целью являлась оценка ледовитости морей.

Еще один банк данных, предоставляющий информацию о состоянии поверхности океана в реальном времени, OSI SAF (<http://www.osi-saf.org/>). Доступны данные разного пространственного и временного разрешения о температуре поверхности моря, температуре поверхности морского льда, концентрации морского льда и др. Один из их продуктов – реанализ OSI-450, вторая версия OSI SAF Global Sea Ice Concentration Climate Data Record (SIC CDR v2.0), которая охватывает временной период с 1979 по 2015 гг. Концентрация морского льда рассчитана инструментами SMMR (1979–1987), SSM/I (1987–2008), и SSMIS (2006–2015), а также с применением данных ECMWF ERA-Interim [4]. Данный продукт используется для исследования и прогнозирования ледовых условий арктического [5] и антарктического [6] регионов, и других северных замерзающих акваторий [7].

В настоящей работе проанализированы результаты реанализа OSI-450 как альтернативного источника данных для исследования ледяного покрова Азовского моря. Данные о ледовом режиме Азовского моря обобщены и систематизированы в Геоинформационной системе (ГИС) южных морей России [8,9]. ГИС содержит растровые (рис.1), векторные и числовые данные о ледовых характеристиках Азовского и Каспийского морей: площадь ледяного покрова, сроки образования и разрушения льда, продолжительность ледового сезона и др. Но существуют пробелы в данных. Это связано с ограниченным доступом или полным отсутствием литературных источников (и других бумажных носителей), которые являются основным форматом хранения исторических данных. Ввиду этого необходим альтернативный источник информации, которым может выступить глобальный реанализ.

Реанализ OSI-450 представлен в открытом доступе в сети Интернет по адресу (<ftp://osisaf.met.no/reprocessed/ice/conc/v2p0>) в формате NetCDF4. Пространственный охват – весь мир, разрешение 25×25 км, проекция Lambert Azimutal, временной охват – ежедневный (1 расчетный день – 1 файл netCDF4 для каждого дня отдельный файл с данными).

Файл содержит 6 переменных:

- ice_conc – концентрация морского льда в процентах (%) от 0 до 100 в каждой ячейке сетки;
- raw_ice_conc_values – данные о концентрации морского льда до фильтрации (обработки) полученных данных;
- total_standard_error, smearing_standard error, algorithm_standard_error – значение стандартной ошибки;

– status flag – информация о шагах обработки.

С помощью лицензионного программного обеспечения ArcGIS 10.* была создана модель для обработки данных (рис.2).

Рис. 1 Количество накопленных и обработанных картосхем по годам в Азовском море

Рис. 2 Автоматизированная модель обработки данных в ArcGIS

В результате получены значения площади ледяного покрова Азовского моря за период 1979–2015 гг. с суточным шагом, для оценки качества которых было выполнено сравнение со значениями площади ледяного покрова (выраженными в %) из ГИС «Ледовый режим южных морей России» (рис.3).

Как видно из рисунка 3, реанализ достаточно хорошо воспроизводит ледовитость до 20 %. Абсолютная ошибка – 14,7. Коэффициент корреляции данных составляет 0,9.

Далее, были рассчитаны средние значения ледовитости за сезон и сопоставлены с данными ГИС (рис.4). Для анализа выбран непрерывный период 2000–2015 гг. Среднегодовое значение за рассматриваемый период по данным реанализа OSI-450 составляет 23,3 %, по данным ГИС – 37,2 %; максимальные и минимальные значения – 43 %/69,4 % и 8,2 %/8 % соответственно. Показано, что данные реанализа OSI-450 занижают значения ледовитости за сезон, несмотря на то, что коэффициент корреля-

ции с суммой среднемесячных температур воздуха составляет минус 0,87 (температура воздуха за зимний сезон – ключевой фактор, определяющий ледовые условия Азовского моря). Но в целом, реанализ воспроизводит многолетнюю динамику ледяного покрова за рассматриваемый период.

Также были рассмотрены сроки образования и разрушения льда на прибрежных гидрометеорологических станциях (ГМС) и ближайших узлах реанализа.

По данным реанализа, лёд ежегодно в прибрежных мелководных районах наблюдается с 1 ноября по 31 марта, что не соответствует действительности, так как сроки образования и разрушения льда в Азовском море значительно варьируются (табл.1).

В [10] отмечено, что в некоторых случаях OSI-450 воспроизводит небольшое количество льда в районах, где по данным ледовых карт – чистая вода, а также занижает концентрацию льда в период таяния. Это связано с тем, что на концентрацию льда в радиометре влияет атмосферный шум, который в результате увеличивает концентрацию льда выше нуля. Валидация данных реанализа проводилась путем сравнения данных концентрации льда полученных инструментами спутникового микроволнового радиометра и ледовых карт арктического

региона, составленных Национальным ледовым центром NOAA (<http://www.natice.noaa.gov/>). Стандартное отклонение составило 5 % для ледяного покрова и 8 % для чистой воды, что является допустимым.

Рис. 3. Корреляционная диаграмма реанализа OSI-450 (ось X) и данных наблюдений из ГИС «Ледовый режим южных морей России» (ось Y)

Рис. 4 Ледовитость Азовского моря и сумма среднемесячных температур воздуха, °C

Стоит отметить, что реанализ OSI-450 – глобальный продукт. При этом, Азовское море – внутренняя мелководная акватория, ледовые условия которого в первую очередь определяются динамикой температуры воздуха в регионе. Но помимо этого также

оказывают влияние изрезанность берегов, низкая соленость, динамическое воздействие ветра и т.д. В совокупности эти факторы формируют чрезвычайно сложную картину изменчивости ледовых условий во времени и пространстве.

Таблица 1 Среднемноголетние даты наступления ледовых фаз по пунктам Азовского моря по данным [9, 11]

Пункт наблюдений	период наблюдений	Дата появления льда			Дата очищения ото льда		
		Средняя	Ранняя	Поздняя	Средняя	Ранняя	Поздняя
Таганрог	(1916–2015)	30.11	17.10.1976	18.01.2010	21.03	18.02.1927	23.04.1929
Мариуполь	(1965–2013)	20.12	12.11.1993	05.02.1966	14.03	27.01.1983	19.04.2012
Ейск	(1922–2015)	13.12	03.11.1925	24.02.2007	26.03	15.01.2013	24.04.1929
Приморско-Ахтарск	(1916–2015)	07.12	01.11.1947	23.02.2004	22.03	28.01.1995	19.04.1929
Керчь	(1927–2015)	29.12	19.10.1976	26.02.1938	28.02	25.12.1998	07.04.1954

На основе проведенного исследования сделан вывод, что реанализ OSI-450 может выступать в качестве альтернативного источника данных о состоянии ледяного покрова, но с учетом поправочных коэффициентов. Например, в работах [12–14], применяют корректировку данных реанализа полей ветра для последующего

расчета ветрового волнения. Процедура может быть адаптирована и применена для реанализа других параметров среды, например, концентрации льда.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90131.

Список литературы:

- Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. – М., 2009. – 287 с.
- Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П., Макаревич П.Р., Дженюк С.Л., Кулыгин В.В., Яицкая Н.А., Поважный В.В., Швердяев И.В., Кумпан С.В., Третьякова И.А., Цыганкова А.Е. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Регион 1. Моря Восточной Арктики. Регион 2. Чёрное, Азовское и Каспийское моря – Ростов н/Д: Издательство ЮНЦ РАН, 2014. – 256 с.
- Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Dzhenyuk S.L., Smolyar I.V., Kulygin V.V., Yaitskaya N.A., Povazhnyi V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tretyakova I.A., Tsygankova A.E., D'yakov N.N., Fomin V.V., Klochkov D.N., Shatohin B.M., Plotnikov V.V., Vakulskaya N.M., Luchin V.A., Kruts A.A. Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013), NOAA Atlas NESDIS 78, U.S., Government Printing Office, Washington D.C., 2014, 131 p.
- EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility. Global sea ice concentration climate data record 1979–2015 (v2.0, 2017), [Online]. Norwegian and Danish Meteorological Institutes. doi: 10.15770/EUM_SAF_OSI_0008
- Rolph R. J., Feltham D. L., Schröder D. Changes of the Arctic marginal ice zone during the satellite era //The Cryosphere. – 2020. – Т. 14. – №. 6. – С. 1971–1984.
- Zampieri L., Goessling H. F., Jung T. Predictability of Antarctic sea ice edge on subseasonal time scales //Geophysical Research Letters. – 2019. – Т. 46. – №. 16. – С. 9719–9727.
- Dai P. et al. Seasonal to decadal predictions of regional Arctic sea ice by assimilating sea surface temperature in the Norwegian Climate Prediction Model //Climate Dynamics. – 2020. – С. 1–16.
- Яицкая Н.А., Салтановская Е.В. Геоинформационная система ледового режима южных морей России // Экология, экономика, информатика. Т. 2: Геоинформационные науки и экологическое развитие: новые подходы, методы, технологии. Геоинформационные технологии и космический мониторинг (п. Абрау-Дюрсо, 8–13 сентября 2013 г.). Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. 2013. С. 217–219.
- Яицкая Н. А., Магаева А. А. Динамика ледового режима Азовского моря в XX–XXI вв //Лёд и Снег. – 2018. – Т. 58. – №. 3. – С. 373–386.
- Sorensen, A. M., T. Lavergne, and S. Eastwood (2017), Global sea ice concentration climate data record, product user manual, product OSI-450, document version 1.0, data set version 2.0, doi:10.15770/EUM_SAF_OSI_0008.
- Дьяков Н.Н., Тимошенко Т.Ю., Белогубов А.А., Горбач С.Б. Атлас льдов Черного и Азовского морей. // Севастополь: ООО «НПЦ «Экоси-гидрофизика», 2015. – 219 с.
- Лопатухин Л. И., Яицкая Н. А. Волновой климат Каспийского моря. Входные данные по ветру для гидродинамического моделирования и некоторые результаты расчетов //Океанология. – 2019. – Т. 59. – №. 1. – С. 12–21.
- Бухановский А. В. и др. Шторм на Черном море 11 ноября 2007 г. и статистики экстремальных штормов моря // Известия Русского географического общества. – 2009. – Т. 141. – №. 2. – С. 71–80.
- Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Дегтярев А.Б., Рожков В.А. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2003. 213 с.

USING REANALYSIS DATA FOR RESEARCHING THE ICE COVER OF THE SEA OF AZOV

A.A. Magaeva^{1,2}, N.A. Yaitskaya³

¹Federal Research Center Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia

²Institute of Earth Sciences SFU, Rostov-on-Don, Russia

³Sochi Research Center of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia

Abstract. The article presents an analysis of the results of the OSI-450 reanalysis as an alternative data source for the study of the ice cover of the Azov Sea. OSI-450 is the second major version of the OSI SAF Global Sea Ice Concentration Climate Data Record (CDR). The OSI-450 product is available for the period 1979 to 2015. Using licensed software ArcGIS 10.*, a model for data processing was created. The average long-term value of the ice cover for the period 2000–2015 according to the OSI-450 reanalysis data is 23.3 %, according to GIS data – 37.2 %; the maximum and minimum values are 43 % / 69.4 % and 8.2 % / 8 %, respectively. The correlation coefficient with the sum of average monthly air temperatures is minus 0.87 (air temperature for the winter season is a main factor that determines the ice conditions of the Sea of Azov). It is shown that the OSI-450 reanalysis data underestimate the ice extent for the season, but on the whole reproduces the long-term dynamics of the ice cover for the period under consideration. Based on the study, it was concluded that the OSI-450 reanalysis can act as an alternative source of data on the state of the ice cover, but taking into account correction factors.

Keywords: ice cover, reanalysis, GIS, the Sea of Azov.

Reference:

1. Abuzyarov Z.K., Dumanskaya I.O., Nesterov E.S. Operativnoe okeanograficheskoe obsluzhivanie. – M., 2009. – 287 p [in Russian].
2. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Makarevich P.R., Dzenyuk S.L., Kulygin V.V., Yaichkaya N.A., Povazhnyy V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tretyakova I.A., Cygankova A.E. Atlas klimaticheskikh izmenenij v bol'shikh morskikh ekosistemah Severnogo polushariya (1878–2013). Region 1. Morya Vostochnoj Arktiki. Region 2. Chyornoe, Azovskoe i Kaspijskoe morya. Atlas of climatic changes in large marine ecosystems of the Northern Hemisphere (1878–2013). Region 1. The seas of the Eastern Arctic. Region 2. Black, Azov and Caspian Seas. Rostov-on-Don: Publishing house of the SSC RAS, 2014: 256 p. [In Russian].
3. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Dzenyuk S.L., Smolyar I.V., Kulygin V.V., Yaitskaya N.A., Povazhnyy V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tretyakova I.A., Tsygankova A.E., D'yakov N.N., Fomin V.V., Klockhov D.N., Shatohin B.M., Plotnikov V.V., Vakulskaya N.M., Luchin V.A., Kruts A.A. Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013), NOAA Atlas NESDIS 78, U.S., Government Printing Office, Washington D.C., 2014, 131 p [in English].
4. EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility. Global sea ice concentration climate data record 1979–2015 (v2.0, 2017), [Online]. Norwegian and Danish Meteorological Institutes. doi: 10.15770/EUM_SAF_OSI_0008 [in English].
5. Rolph R. J., Feltham D. L., Schröder D. Changes of the Arctic marginal ice zone during the satellite era //The Cryosphere. – 2020. – T. 14. – №. 6. – C. 1971–1984 [in English].
6. Zampieri L., Goessling H. F., Jung T. Predictability of Antarctic sea ice edge on subseasonal time scales //Geophysical Research Letters. – 2019. – T. 46. – №. 16. – C. 9719–9727 [in English].
7. Dai P. et al. Seasonal to decadal predictions of regional Arctic sea ice by assimilating sea surface temperature in the Norwegian Climate Prediction Model //Climate Dynamics. – 2020. – C. 1–16 [in English].
8. Yaitskaya N.A., Saltanovskaya E.V. Geoinformation system of the ice regime of the southern seas of Russia. Ekologiya, ekonomika, informatika. T.2: Geoinformacionnye nauki i ekologicheskoe razvitie: novye podhody, metody, tekhnologii. Geoinformacionnye tekhnologii i kosmicheskij monitoring (p.Abrayu-Dyurso, 8–13 sentyabrya 2013 g.). Rostov-na-Donu: Izd-vo YUFU. Ecology, economics, informatics. T. 2: Geoinformation sciences and ecological development: new approaches, methods, technologies. Geoinformation technologies and space monitoring (Abrau-Durso, September 8–13, 2013). Rostov-on-Don: Publishing house of SFEDU. 2013: 217–219. [In Russian].
9. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Dynamics of the ice regime of the Sea of Azov in the XX–XXI centuries. Led i Sneg. Ice and Snow. 2018. 58 (3): 373–386. (In Russian). doi: 10.15356/2076–6734-2018–3-373–386 [in Russian].
10. Sorensen, A. M., T. Lavergne, and S. Eastwood (2017), Global sea ice concentration climate data record, product user manual, product OSI-450, document version 1.0, data set version 2.0, doi:10.15770/EUM_SAF_OSI_0008 [in English].
11. D'yakov N.N., Timoshenko T.Yu., Belogubov A.A., Gorbach S.B. Atlas Idov Chernogo i Azovskogo morej. // Sevastopol': OOO «NPC «Ekosi-gidrofizika», 2015. – 219 p [in Russian].

12. Lopatoukhin L. I., Yaitskaya N. A. Wave climate of the Caspian Sea, input wind data for hydrodynamic modeling, and some calculation results //Oceanology. – 2019. – Т. 59. – №. 1. – P. 7–16[in Russian].
13. Buhanovskij A. V. i dr. Shtorm na Chernom more 11 noyabrya 2007 g. i statistiki ekstremal'nyh shtormov morya //Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva. – 2009. – Т. 141. – №. 2. – P. 71–80[in Russian].
14. Lopatuhin L.I., Buhanovskij A.V., Degtyarev A.B., Rozhkov V.A. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Barenceva, Ohotskogo i Kaspijskogo morej. SPb.: Rossijskij morskoy registr sudohodstva, 2003. 213 p[in Russian].