

Спутниковый мониторинг ледяного покрова в Азовском море в зимний период 2022/2023 гг.

А. Г. Костяной^{1,3,4}, Е. А. Костяная¹, О. Ю. Лаврова², А. Я. Строчков²

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mails: kostianoy@gmail.com, janekost@mail.ru

² *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

³ *Московский университет имени С. Ю. Витте, Москва, 115432, Россия*

⁴ *Майкопский государственный технологический университет*
Майкоп, 385000, Россия

Приведены результаты спутникового мониторинга ледяного покрова Азовского моря зимой 2022/2023 гг. на основе ежедневных радиолокационных изображений (РЛИ) морской поверхности SAR-C (*англ.* Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1A и безоблачных изображений видимого диапазона MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2, OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8, -9. Пространственное разрешение использованных спутниковых данных составляло 10–30 м, что позволило идентифицировать даже небольшие ледовые образования. С 1 декабря 2022 г. по 31 марта 2023 г. было получено и проанализировано 52 РЛИ по району Керченского пролива и 73 РЛИ по району Таганрогского зал. Показано, что в эту зиму лёд фактически отсутствовал в районе Керченского пролива и образовывался только в Таганрогском зал., как и в предыдущие годы. Отсутствие льда в Керченском проливе подтверждается относительно высокой температурой воздуха в зимний период над тем же районом и температурой воды в районе Керченского пролива. Ежегодное присутствие льда в Таганрогском зал. объясняется тем, что зимой это самый холодный и мелководный район Азовского моря; кроме того, это наиболее распреснённый район за счёт стока рек Дон, Кальмиус, Миус и Ея.

Ключевые слова: Чёрное море, Азовское море, Керченский пролив, Таганрогский залив, Крымский мост, ледяной покров, температура воздуха, спутниковые изображения, спутниковый мониторинг, спутниковая радиолокация, данные видимого диапазона, SAR-C Sentinel-1, MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8, -9

Одобрена к печати: 28.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-276-288

Введение

Керченский пролив играет важную роль в водообмене между Азовским и Чёрным морем (Kosarev et al., 2008), является важным транспортным коридором для морских перевозок (*рис. 1*, см. с. 277), а также обладает большим военно-стратегическим значением, причём не только в настоящее время, но и с исторических времён. Строительство и открытие Крымского моста через Керченский пролив в мае 2018 г. придало этому району ещё большее значение, поскольку он связал бесперебойным автомобильным и железнодорожным транспортом Крымский п-ов с Краснодарским краем.

Современный интерес к изучению течений, водообмена и ледового режима в Керченском проливе возник уже в конце 2003 г., после того как в октябре 2003 г. была построена дамба между о. Тузла и Таманским п-овом, протяжённость которой соизмерима с размерами трёх узкостей, через которые осуществлялся водообмен между Чёрным и Азовским морями. Таким образом, система течений и водообмен в Керченском проливе могли измениться.

В связи с этим был организован комплексный спутниковый мониторинг района Керченского пролива, основывающийся на спутниковых изображениях в оптическом, инфракрасном (ИК) и микроволновом диапазонах (AVHRR NOAA (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer, National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление

океанических и атмосферных исследований, США), MODIS Aqua/Terra (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), MERIS Envisat (англ. Medium Resolution Imaging Spectrometer), ASAR Envisat (англ. Advanced Synthetic Aperture Radar) и SAR ERS-2 (англ. Synthetic Aperture Radar, European Remote-Sensing Satellite)), который показал, что наилучший результат при наблюдении за течениями в Керченском проливе достигается при использовании синтезированных в естественных цветах изображений MERIS Envisat и MODIS Aqua, а также карт поверхностной температуры и распределения хлорофилла *a*, восстановленных из данных AVHRR NOAA и MODIS Aqua/Terra (Щербак и др., 2007). Радиолокационные данные, которые не несут непосредственную информацию о течениях, могут давать дополнительные сведения о гидрофизических и гидрометеорологических явлениях в проливе и прилегающих акваториях, в том числе о ледяном покрове, который очень хорошо идентифицируется на радиолокационных изображениях даже при наличии сплошной облачности (Лаврова и др., 2011, 2017; Lavrova et al., 2022).

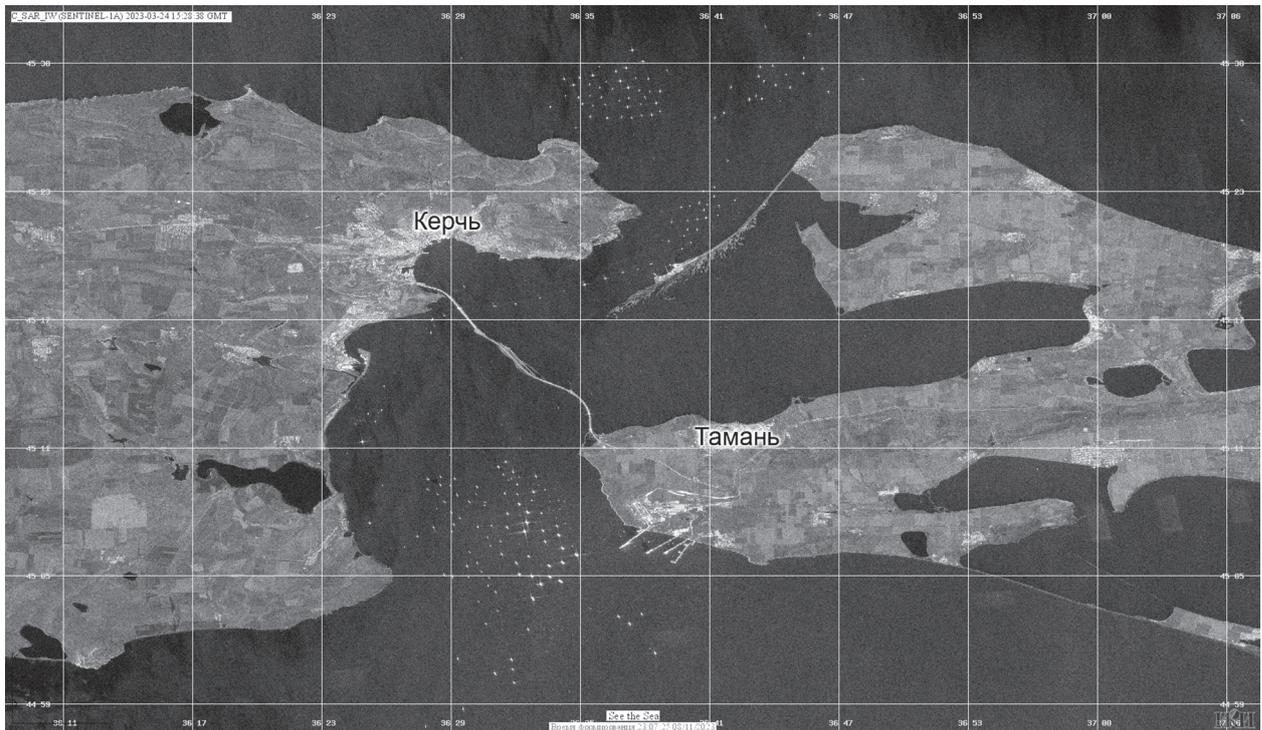


Рис. 1. Спутниковое радиолокационное изображение Керченского пролива от 24 марта 2023 г. (SAR-C Sentinel-1A). Белые точки — скопление судов в Керченском проливе (©ESA, 2023)

Авторы работы (Дашкевич и др., 2016) на основе моделирования, наблюдений в портах и по спутниковым снимкам показали, что средняя за зимний сезон ледовитость Азовского моря в первые 16 лет XXI в. примерно вдвое меньше (16 %), чем в середине XX в. (30 %). В самую суровую зиму 1953/1954 гг. за весь период наблюдения с 1885 до 2015 г. ледовитость достигала примерно 68 % (Яицкая, Магаева, 2018). В зиму 2002/2003 гг., которая, по оценкам Н.А. Яицкой и А.А. Магаевой (2018), была в Азовском море даже более суровая, чем зима 2011/2012 гг., ледовитость достигала примерно 45 %. Наибольшая толщина льда в Азовском море (до 50 см), как правило, наблюдается в Таганрогском зал. в северо-восточной части Азовского моря.

Кроме того, Яицкая и Магаева (2018) показали, что в интервал с 1950 до 2015 г. в портах Азовского моря ледовый период значительно сократился. Например, начало ледостава в порту Таганрога сместилось с середины ноября в 1950 г. к середине декабря в 2015 г., а полное исчезновение льда — с первых чисел апреля в 1950 г. к середине марта в 2015 г. В порту Керчи смещение этих дат произошло со второй половины декабря к началу января и с середины

марта к середине февраля соответственно. Таким образом, средняя продолжительность ледового периода с 1950 до 2015 г. сократилась примерно на месяц – полтора.

Магаева и Яицкая (2019, 2020, 2021) в своих исследованиях ледового режима Азовского моря показали, что в период 2000–2020 гг. сократилась вероятность обнаружения льда в ноябре, марте и апреле. На гидрометеорологической станции (ГМС) Керчи в период 2000–2020 гг. в 35 % случаев ледяной покровов вовсе не наблюдается; продолжительность ледового сезона составляет всего 48–68 дней, что объясняется положительными аномалиями температуры воздуха в октябре – декабре (1,1 и 1,6 °С соответственно) и марте (0,2 °С). На фоне роста значений среднемесячной температуры воздуха зимнего периода площадь припая сокращается, при этом в зиму 2019/2020 гг. на Азовском море припай вовсе не наблюдался.

А. И. Гинзбург с коллегами (2021) для исследования межгодовой изменчивости ледяного покрова Азовского моря использовали среднемесячные значения концентрации льда в Азовском море за период 1980–2020 гг. по данным Европейской организации спутниковой метеорологии EUMETSAT (*англ.* European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) (Eastwood et al., 2016). Было показано, что ледовитость в Азовском море в период 1980–2020 гг. в среднем уменьшалась со скоростью 1,2 %/10 лет. В 2000-е гг. увеличилось количество зим со среднемесячной ледовитостью менее 10 %, что соответствует увеличению количества в эти годы мягких зим (Гинзбург и др., 2021). Это подтверждается наблюдениями, когда в зимы 1980/1981 гг., 1989/1990, 2000/2001, 2006/2007, 2014/2015, 2015/2016 и 2018/2019 гг. лёд в Азовском море практически отсутствовал. Ледовитость выше 50 % наблюдалась в холодные зимы 1979/1980 гг., 1981/1982, 1984/1985, 1986/1987, 1987/1988, 1995/1996, 2001/2002, 2005/2006, 2007/2008 и 2011/2012 гг. (Гинзбург и др., 2021). Зимой 2016/2017 гг. среднемесячная концентрация льда в Азовском море достигала 46 %.

В феврале 2017 г. Е. А. Лупян с коллегами (2017) по спутниковым оптическим и радиолокационным данным высокого пространственного разрешения обнаружили, что опоры Крымского моста (даже в самой широкой судоходной части шириной 227 м) не пропускают лёд из Азовского моря в Чёрное море, чего не наблюдалось до его строительства (Лаврова и др., 2017). Это обстоятельство придало новый импульс для тщательного исследования гидродинамических и гидрофизических процессов, протекающих в данном районе, включая пространственно-временные характеристики ледяного покрова.

С 2021 г. в Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН начал выполняться проект Российского научного фонда (РНФ) № 21-17-00191 «Мониторинг водообмена через Керченский пролив на основе современных методов наблюдений и численного моделирования» (2021–2023), цель которого состоит в исследовании динамических механизмов водообмена между двумя морями. Составной частью данного проекта является спутниковый мониторинг ледяного покрова в зимний период, необходимость которого стала очевидна вследствие вышеупомянутых событий в районе Крымского моста в феврале 2017 г. Результаты этого мониторинга в зимний период 2020/2021 и 2021/2022 гг. были представлены в работе (Костяной и др., 2022б). В частности, было показано, что лёд в эти зимы в районе Керченского пролива отсутствовал, что подтверждает продолжающееся потепление климата в регионе Азовского моря (Гинзбург и др., 2021). Сравнение с данными, представленными в Третьем оценочном докладе Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) об изменении климата и их последствиях на территории Российской Федерации, показало, что температура воздуха и воды в районе Керченского пролива растёт со скоростью примерно 0,5 °С за десять лет по данным за 1980–2020 гг. (Гинзбург и др., 2021; Костяной и др., 2022а), а по данным за 2010–2022 гг. линейный тренд для температуры воздуха увеличился до 1 °С за десять лет (Костяной и др., 2022б). Поэтому с зимы 2011/2012 гг. площадь ледяного покрова в Азовском море постоянно сокращается, а после зимы 2016/2017 гг., когда лёд покрывал почти половину акватории Азовского моря, лёд наблюдается только в мелководном Таганрогском зал., площадь которого составляет лишь 14 % от акватории всего Азовского моря.

Спутниковый мониторинг ледяного покрова Азовского моря в зимний период 2022/2023 гг. был продолжен, и его результаты представлены в данной статье.

Анализ спутниковых радиолокационных изображений и сопутствующей метеорологической информации

С 1 декабря 2022 г. по 31 марта 2023 г. был проведён ежедневный мониторинг ледяного покрова Азовского моря с особым вниманием к Керченскому проливу и Таганрогскому зал. с помощью радара с синтезированной апертурой (РСА) SAR-C (*англ.* Synthetic Aperture Radar), установленного на спутнике Sentinel-1A Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency — ESA). Всего было получено и проанализировано 52 РЛИ по району Керченского пролива и 73 РЛИ по району Таганрогского зал. с пространственным разрешением 10 м. Из-за практически постоянной облачности над исследуемым районом только 16 изображений видимого диапазона (MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2 и OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8, -9) были информативны и использованы для анализа. Поскольку зима 2022/2023 гг., также как и предыдущие зимы 2020/2021 и 2021/2022 гг., была очень тёплой в регионе Азовского моря (*рис. 2–4*, см. с. 280), то на большей части его акватории лёд не образовался, в том числе и в Керченском проливе, расположенном на его южной периферии. Использование оптических данных среднего пространственного разрешения (например, с MODIS-Aqua/Terra (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), 250–1000 м) не имело смысла, поскольку площади наблюдаемого льда были минимальными и облачность являлась препятствием для получения информативных снимков. Высокое пространственное разрешение (10–30 м) радиолокационных данных и данных видимого диапазона позволило идентифицировать даже небольшие ледовые образования.

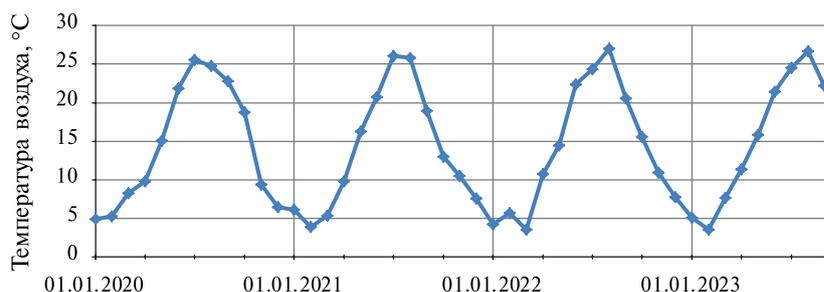


Рис. 2. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячной температуры воздуха на высоте 2 м в Керченском проливе (45,0–45,5° с. ш.; 36,25–37,0° в. д.) по данным атмосферного реанализа MERRA-2 с января 2020 г. по сентябрь 2023 г. (MERRA-2..., 2015)

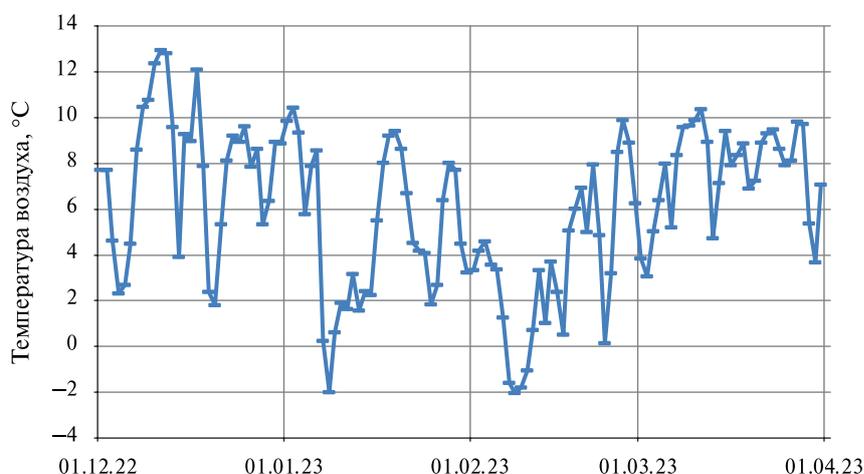


Рис. 3. Временная изменчивость среднесуточной температуры воздуха на высоте 2 м в Керченском проливе (45,0–45,5° с. ш.; 36,25–37,0° в. д.) по данным атмосферного реанализа MERRA-2 с 1 декабря 2022 г. по 31 марта 2023 г. (MERRA-2..., 2015)

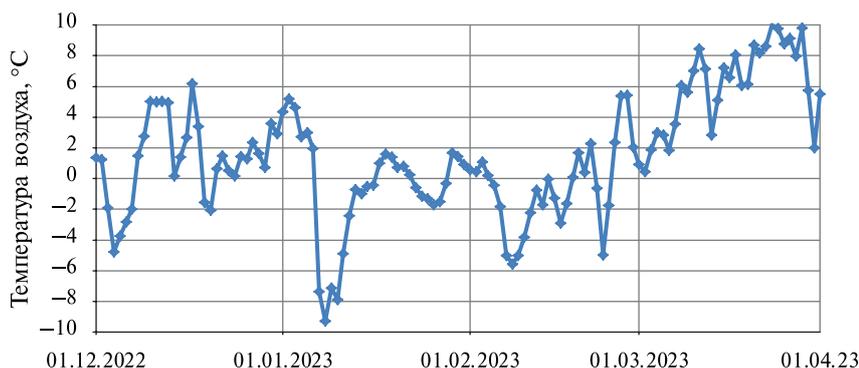


Рис. 4. Временная изменчивость среднесуточной температуры воздуха на высоте 2 м в Таганрогском зал. (46,6–47,3° с. ш.; 37,7–39,3° в. д.) по данным атмосферного реанализа MERRA-2 с 1 декабря 2022 по 31 марта 2023 г. (MERRA-2..., 2015)

Первый лёд в Азовском море появился вдоль побережья крайней северо-восточной части Таганрогского зал. 30 ноября 2022 г., что было связано с выхолаживанием ночью до -3°C (по данным метеостанции Ростова-на-Дону). Максимум ледяной покров достиг 4–5 декабря (рис. 5), когда среднесуточная температура воздуха опустилась до $-4...-5^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 4). К 8 декабря температура воздуха повысилась до $+2^{\circ}\text{C}$ и оставалась положительной до первых чисел января 2023 г. Однако остатки ледяного покрова наблюдались вдоль северного побережья Таганрогского зал. вплоть до 25 декабря 2022 г. (рис. 6, см. с. 281), потому что периодические ночные заморозки до -4°C фиксировались до 23 декабря и не позволяли льду активно таять.



Рис. 5. Спутниковое радиолокационное изображение ледяного покрова в Таганрогском зал. за 5 декабря 2022 г. (SAR-C Sentinel-1A; ©ESA, 2022)

Следующее резкое похолодание произошло 7 января 2023 г., когда температура воздуха в Ростове-на-Дону к вечеру опустилась до -15°C , а среднесуточная температура воздуха над Таганрогским зал. — до -8°C (см. рис. 4). Соответственно, произошло сильное выхолаживание морской поверхности, и 10 января на РЛИ уже наблюдается лёд практически на всей акватории Таганрогского зал. (рис. 7, см. с. 281).



Рис. 6. Спутниковое радиолокационное изображение ледяного покрова в Таганрогском зал. за 17 декабря 2022 г. (SAR-C Sentinel-1; ©ESA, 2022)

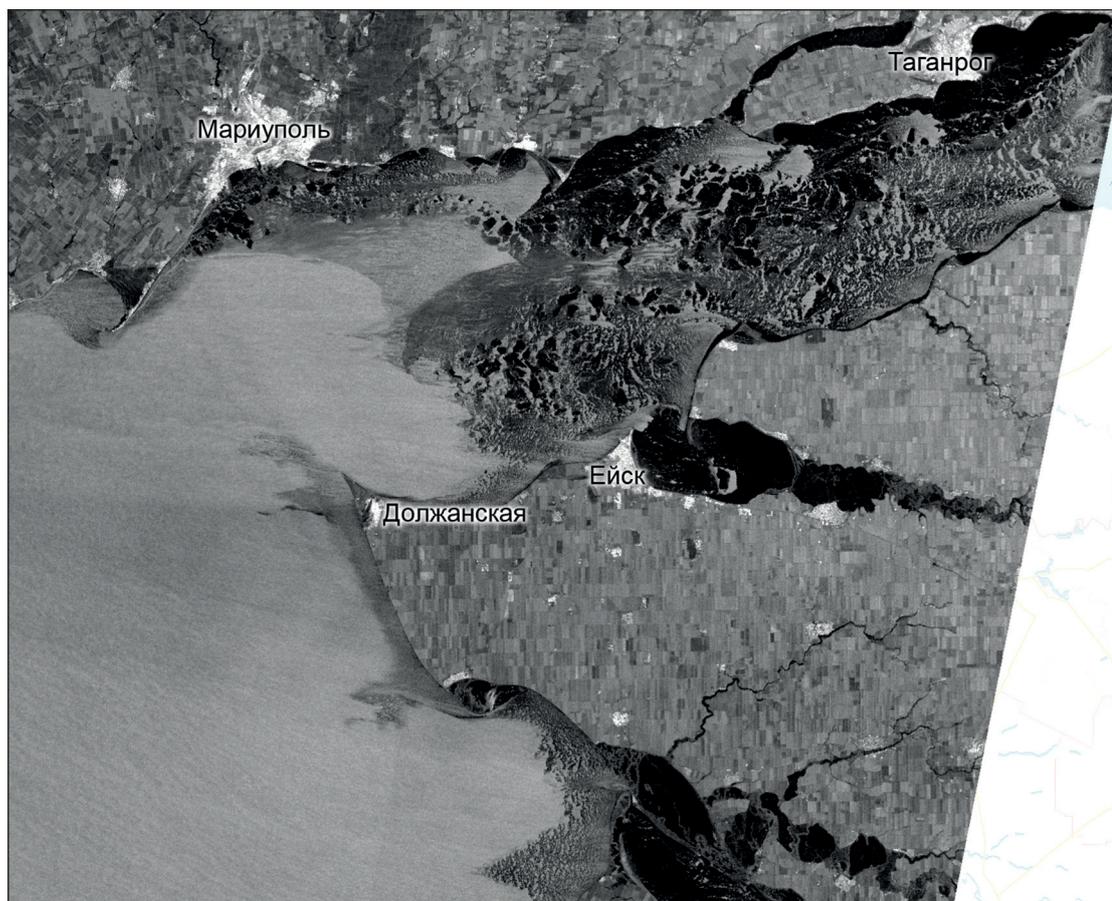


Рис. 7. Спутниковое радиолокационное изображение ледяного покрова в Таганрогском зал. за 10 января 2023 г. (SAR-C Sentinel-1; ©ESA, 2023)

Очередное потепление произошло 16–17 января, когда среднесуточная температура воздуха над Таганрогским зал. незначительно превысила $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. *рис. 4*). И такая ситуация наблюдалась до 5 февраля, когда произошло очередное похолодание в регионе, которое сохранялось до 25 февраля. До 5 февраля лёд постепенно таял, превращаясь в отдельные узкие и длинные ледяные поля, постепенно отрывающиеся от кос, расположенных вдоль северного побережья Азовского моря (*рис. 8*).



Рис. 8. Спутниковое радиолокационное изображение ледяного покрова в Таганрогском зал. за 22 января 2023 г. (SAR-C Sentinel-1; ©ESA, 2023)

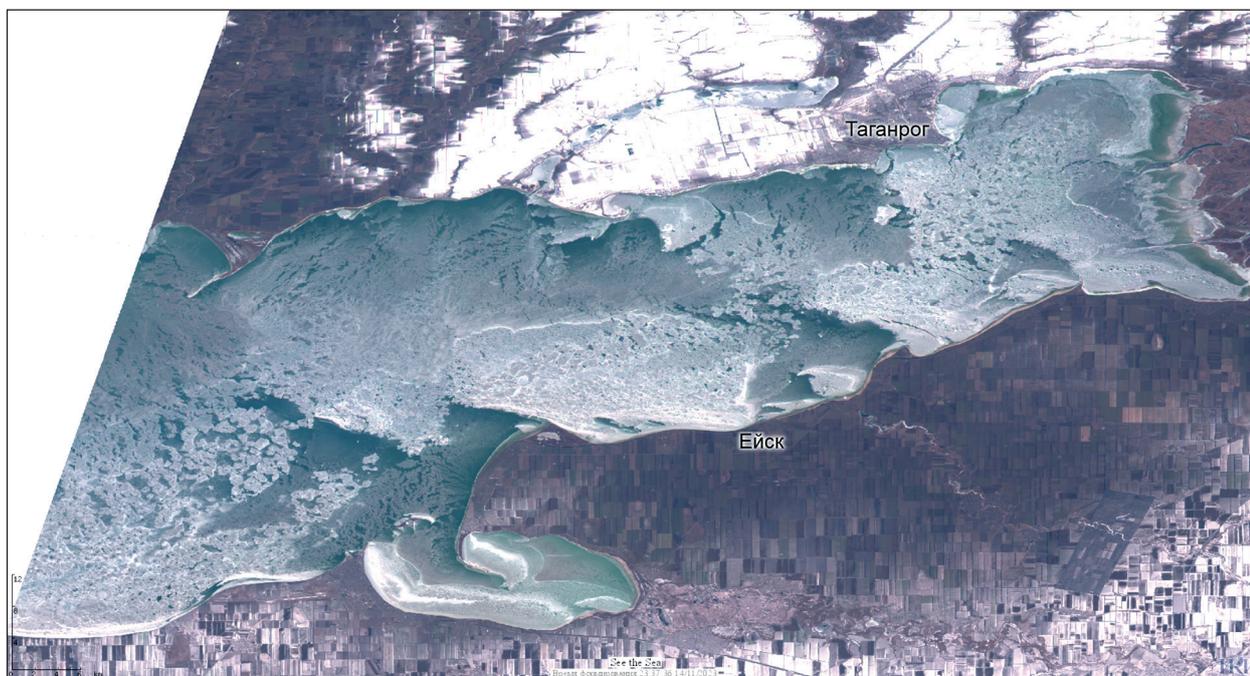


Рис. 9. Ледяной покров в Таганрогском зал. 9 февраля 2023 г. (цветосинтезированное изображение MSI Sentinel-2A; ©ESA, 2023)



Рис. 10. Спутниковое радиолокационное изображение ледяного покрова в северо-восточной части Азовского моря за 11 февраля 2023 г. (SAR-C Sentinel-1A; ©ESA, 2023)



Рис. 11. Спутниковое радиолокационное изображение ледяного покрова в Таганрогском зал. за 23 февраля 2023 г. (SAR-C Sentinel-1; ©ESA, 2023)

К 11 февраля лёд на акватории Азовского моря достиг своего максимального развития, когда он покрывал не только весь Таганрогский зал. — северное побережье моря, но и прилегал к восточному побережью (рис. 9, 10, см. с. 282, 283). К 23 февраля ледяной покров значительно сократился по площади и в виде разрозненных полей оставался только в крайней восточной части залива (рис. 11, см. с. 283). С 25 февраля началось резкое потепление в районе Таганрогского зал., 27 февраля температура воздуха в Ростове-на-Дону достигала $+18^{\circ}\text{C}$, что привело к полному исчезновению льда на акватории Таганрогского зал. к 8 марта 2023 г.

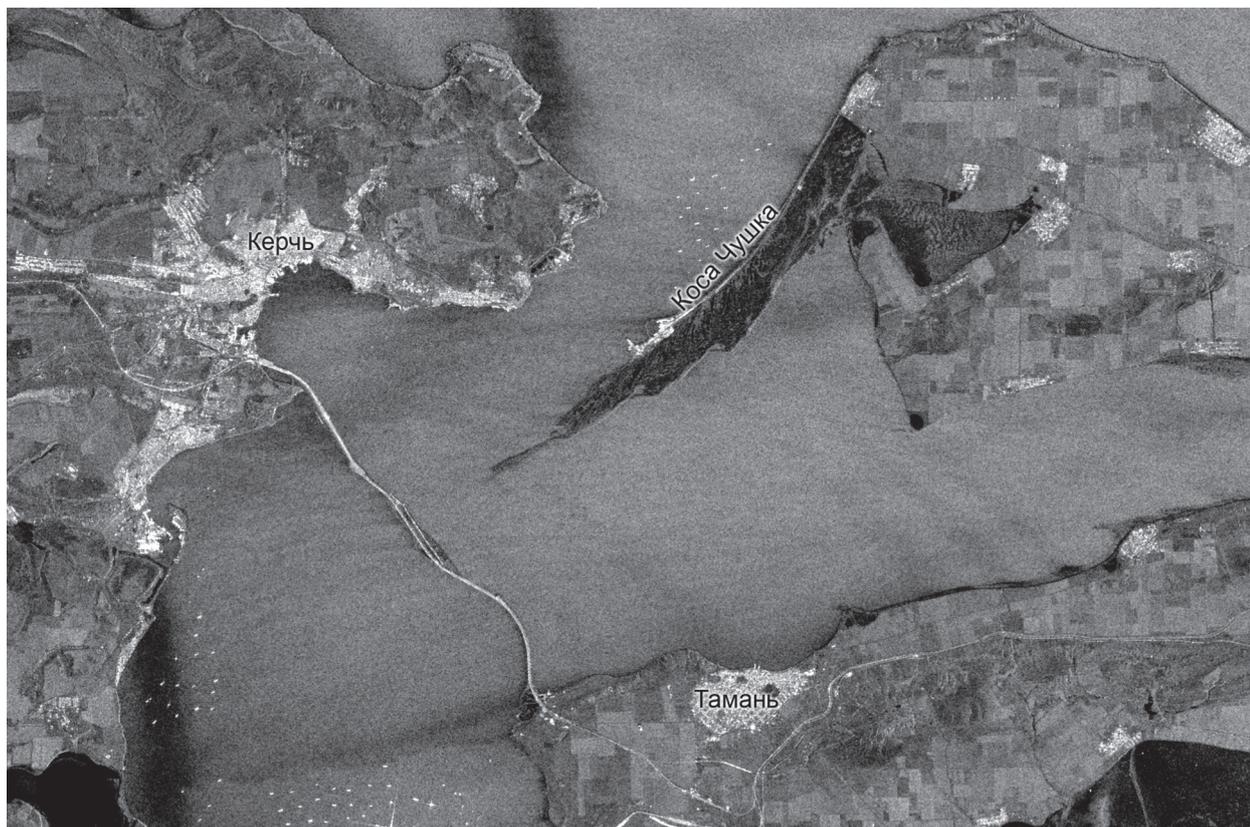


Рис. 12. Спутниковое радиолокационное изображение Керченского пролива от 10 января 2023 г. (SAR-C Sentinel-1; ©ESA, 2023). Лёд в заливах и вдоль косы Чушка. Корабли в Керченском проливе проявляются в виде многочисленных белых точек

В районе **Керченского пролива** зимой 2022/2023 гг. лёд снова практически не наблюдался, что объясняется очередной тёплой зимой, когда среднемесячная температура воздуха не опускалась ниже нуля (см. рис. 2). Если рассмотреть изменчивость среднесуточной температуры воздуха в районе Керченского пролива (см. рис. 3), то окажется, что с 1 декабря 2022 г. по 31 марта 2023 г. она опускалась незначительно ниже нуля всего два раза, причём эти события были кратковременными (7–10 января и 6–10 февраля согласно данным метеостанции Керчи температура ночью опускалась до $-4...-7^{\circ}\text{C}$). Этого было явно недостаточно для образования даже тонкого льда в проливе. Оба события по времени совпадали с резким похолоданием в районе Таганрогского зал., но из-за высокой температуры воды и воздуха не приводили к образованию льда. Тем не менее этого понижения температуры хватило для кратковременного образования тонкого льда у восточного берега косы Чушка, в Динском зал. и в мелководных лиманах на Таманском п-ове (Ахтанизовский, Старотитаровский, Цокур, Кизилташский, Бугазский и Витязевский), который простоял с 10 по 22 января (рис. 12, 13, см. с. 285) и с 11 по 16 февраля.



Рис. 13. Ледяной покров в Керченском проливе 11 января 2023 г. (цветосинтезированное изображение OLI Landsat-9; ©USGS, 2023)

Заключение

Спутниковый мониторинг ледяного покрова в Азовском море показал его фактическое отсутствие в районе Керченского пролива зимой 2020/2021, 2021/2022 и 2022/2023 гг., тем самым подтвердил продолжающееся потепление климата в регионе Азовского моря (Гинзбург и др., 2021). Однако лёд ежегодно продолжает кратковременно наблюдаться в районе мелководного и распреснённого Таганрогского зал., площадь которого составляет всего 14 % от акватории всего Азовского моря. Это самый холодный район Азовского моря, температура воздуха над которым может быть на 6–8 °С ниже, чем в районе Керченского пролива. Этими факторами и объясняется кардинальная разница ледового режима Таганрогского зал. и Керченского пролива.

Тем не менее нельзя исключать наблюдения аномально холодных зим в районе Азовского моря и Керченского пролива и в будущем, поскольку в XXI в. это уже происходило неоднократно: в 2001/2002, 2005/2006, 2007/2008, 2011/2012 и 2016/2017 гг., когда ледяной покров Азовского моря достигал 50 % и более (Гинзбург и др., 2021). При одновременном стечении ряда неблагоприятных факторов (продолжительный северный ветер, течение, направленное на юг) в Керченском проливе может возникнуть снова критическая ситуация с концентрацией льда у Крымского моста, подобная той, которая сложилась в феврале 2017 г. (Лупян и др., 2017). В связи с этим необходимо продолжать спутниковый мониторинг ледяного покрова этого стратегически важного района всеми доступными средствами.

Е. А. Костяная выполняла исследование пространственно-временной изменчивости ледяного покрова в Азовском море в рамках проекта РФФ № 21-17-00191 (2021–2023) «Мониторинг водообмена через Керченский пролив на основе современных методов наблюдений и численного моделирования». А. Г. Костяной занимался изучением динамики ледяного покрова и его связи с температурой воздуха в рамках госзадания № FMWE-2024-0016 «Механизмы формирования циркуляционных структур Мирового океана: ключевые процессы в пограничных слоях и их роль в динамике океана на основе экспедиционных исследований,

дистанционного зондирования, численного и лабораторного моделирования». Анализ данных о температуре воздуха был выполнен с помощью онлайн-системы данных GIOVANNI (англ. GES-DISC Interactive Online Visualization And ANalysis Infrastructure), разработанной и поддерживаемой NASA GES DISC (NASA — англ. National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — НАСА) (Acker, Leptoukh, 2007). Подбор, обработка и анализ спутниковой информации осуществлялись О. Ю. Лавровой и А. Я. Строчковым с использованием возможностей информационной системы See the Sea (Лаврова и др., 2019), разработанной и поддерживаемой в Институте космических исследований РАН в рамках государственного задания, тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8.

Литература

1. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей (1980–2020 гг.) // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 6. С. 900–912. DOI: 10.1134/S0001437021060060.
2. Дашкевич Л. В., Немцова Л. Д., Бердников С. В. Оценка ледовитости Азовского моря в XXI веке по спутниковым снимкам Terra/Aqua MODIS и результатам математического моделирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 5. С. 91–100.
3. Костяной А. Г., Еремина Т. Р., Иванов В. В., Лобанов В. Б., Кровнин А. С., Амосова В. М., Афанасьев Д. Ф., Барабанов В. В., Белоусов В. Н., Волощук Е. В., Гинзбург А. И., Гордеева С. М., Долгов А. В., Жукова С. В., Зезера А. С., Зуенко Ю. И., Лардыгина Е. Г., Лебедев С. А., Лучин В. А., Мезенцева Л. И., Михайлова А. В., Разинков В. П., Ростов И. Д., Серых И. В., Трусенкова О. О., Устинова Е. И., Хен Г. В. (2022а) Морские природные системы // Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова. СПб.: Научно-технологические технологии, 2022. С. 192–238.
4. Костяной А. Г., Костяная Е. А., Лаврова О. Ю. (2022б) Спутниковый мониторинг ледяного покрова в районе Керченского пролива // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 6. С. 195–204. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-195-204.
5. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шерemet Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
6. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Ледовая обстановка в Керченском проливе в текущем столетии. Ретроспективный анализ на основе спутниковых данных // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 2. С. 148–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-148-166.
7. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А., Лупян Е. А. Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
8. Лупян Е. А., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Ледовая обстановка в районе строительства Крымского моста в феврале 2017 г. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 1. С. 247–251. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-247-251.
9. Магаева А. А., Яицкая Н. А. Классификация зим Азовского моря // *Экология. Экономика. Информатика*. Сер.: Геоинформационные технологии и косм. мониторинг. 2019. № 4. С. 147–151.
10. Магаева А. А., Яицкая Н. А. Использование данных реанализа для исследования ледяного покрова Азовского моря // *Экология. Экономика. Информатика*. Сер.: Геоинформационные технологии и косм. мониторинг. 2020. Т. 2. № 5. С. 37–42.
11. Магаева А. А., Яицкая Н. А. Динамика припая Азовского моря в XXI веке // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 74–84. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-74-84.
12. Щербак С. С., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. Возможности спутниковой радиолокации для исследования влияния атмосферных процессов на водообмен в Керченском проливе // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007. Вып. 4. Т. 1. С. 376–383.
13. Яицкая Н. А., Магаева А. А. Многолетняя динамика ледового режима Азовского моря в XX–XXI вв. // *Лёд и снег*. 2018. № 58(3). С. 373–386. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-3-373-386.
14. Acker J. G., Leptoukh G. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // *Eos, Trans. AGU*. 2007. V. 88. No. 2. P. 14–17. DOI: 10.1029/2007EO020003.

15. Eastwood S., Lavergne T., Tonboe R., Hackett B. Product user manual for reprocessed sea ice concentration from EUMETSAT OSI SAF SEAICE_GLO_SEAICE_L4_REP_OBSERVATIONS_011_009. Version 2.4 Copernicus, 2016. 45 p.
16. Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Shiganova T. A. The Azov Sea // The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry / eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. V. 5: Water Pollution, Pt. 5Q. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer-Verlag, 2008. P. 63–90.
17. Lavrova O. Yu., Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Bocharova T. Yu. Interannual variability of ice cover in the Caspian Sea // J. Hydrology X. 2022. V. 17. Article 100145. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100145>.
18. MERRA-2 statD_2d_slv_Nx: 2d, Daily, Aggregated Statistics, Single-Level, Assimilation, Single-Level Diagnostics V5.12.4 / Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015). Greenbelt, MD, USA: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2015. Accessed: 06.11.2023. DOI: 10.5067/9SC1VNTWGWV3.

Satellite monitoring of ice cover in the Sea of Azov in winter 2022/2023

A. G. Kostianoy^{1,3,4}, E. A. Kostianaia¹, O. Yu. Lavrova², A. Ya. Strochkov²

¹ *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mails: kostianoy@gmail.com, janekost@mail.ru

² *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

³ *Moscow Witte University, Moscow 115432, Russia*

⁴ *Maykop State Technological University, Maykop 385000, Russia*

The article presents the results of satellite monitoring of the Sea of Azov ice cover in the winter of 2022/2023 based on daily radar images of the sea surface from Sentinel-1A SAR-C and cloud-free visible images from Sentinel-2 MSI, Landsat-8, -9 OLI. The spatial resolution of the satellite data used was 10–30 m, which made it possible to identify even small ice formations. From December 1, 2022, to March 31, 2023, 52 radar images were received and analyzed in the Kerch Strait area and 73 radar images in the Taganrog Bay area. It is shown that during this winter, ice was virtually absent in the area of the Kerch Strait and formed only in the Taganrog Bay, as in previous years. The absence of ice is confirmed by relatively high air temperature in winter and water temperature in the Kerch Strait area. The annual presence of ice in the Taganrog Bay is explained by the fact that in winter it is the coldest and shallowest area of the Sea of Azov; in addition, it is the most desalinated area due to the runoff of the Don, Kalmius, Mius and Eya rivers.

Keywords: Black Sea, Sea of Azov, Kerch Strait, Taganrog Bay, Crimean Bridge, ice cover, air temperature, satellite images, satellite monitoring, satellite radar imagery, optical imagery, Sentinel-1 SAR-C, Sentinel-2 MSI, Landsat-8, -9 OLI

Accepted: 28.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-276-288

References

1. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A., Climate change in the hydrometeorological parameters of the Black and Azov seas (1980–2020), *Okeanologiya*, 2021, Vol. 61, No. 6, pp. 900–912, (in Russian), DOI: 10.1134/S0001437021060060.
2. Dashkevich L. V., Nemtsova L. D., Berdnikov S. V., Assessment of the Sea of Azov ice cover in the XXI century using Terra/Aqua MODIS images and numerical modelling, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 91–100 (in Russian).
3. Kostianoy A. G., Eremina T. R., Ivanov V. V., Lobanov V. B., Krovnin A. S., Amosova V. M., Afanas'yev D. F., Barabanov V. V., Belousov V. N., Voloshchuk E. V., Ginzburg A. I., Gordeeva S. M., Dolgov A. V.,

- Zhukova S. V., Zezera A. S., Zuenko Yu. I., Lardygina E. G., Lebedev S. A., Luchin V. A., Mezentseva L. I., Mikhaylova A. V., Razinkov V. P., Rostov I. D., Serykh I. V., Trusenкова O. O., Ustinova E. I., Khen G. V. (2022a), Marine natural systems, *Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (The Third Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation), V. M. Kattsov (ed.), Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022, pp. 192–238 (in Russian).
4. Kostianoy A. G., Kostianaia E. A., Lavrova O. Yu. (2022b), Satellite monitoring of the ice cover in the area of Kerch Strait, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 6, pp. 195–204 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-195-204.
 5. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex satellite monitoring of the Russian seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p. (in Russian).
 6. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., Ice conditions in the Kerch Strait in the current century. Retrospective analysis based on satellite data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 148–166 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-148-166.
 7. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Loupian E. A., Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 266–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
 8. Loupian E. A., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., Ice conditions in the construction area of the Crimean Bridge in February 2017, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 247–251 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-247-251.
 9. Magaeva A. A., Yaitskaya N. A., Classification of winters in the Sea of Azov, *Ecology. Economy. Computer science. Ser.: Geoinformation technologies and space monitoring*, 2019, Vol. 1, No. 4, pp. 147–151 (in Russian).
 10. Magaeva A. A., Yaitskaya N. A., Using reanalysis data to study the ice cover of the Azov Sea, *Ecology. Economy. Computer science. Ser.: Geoinformation technologies and space monitoring*, 2020, Vol. 2, No. 5, pp. 37–42 (in Russian).
 11. Magaeva A. A., Yaitskaya N. A., Dynamics of fast ice in the Sea of Azov in the 21st century, *InterCarto. InterGIS*, 2021, Vol. 27, Part 3, pp. 74–84 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-74-84.
 12. Shcherbak S. S., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Possibilities of satellite radar for studying the influence of atmospheric processes on water exchange in the Kerch Strait, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Issue 4, Vol. 1, pp. 376–383 (in Russian).
 13. Yaitskaya N. A., Magayeva A. A., Long-term dynamics of the ice regime of the Sea of Azov in the 20th–21st centuries, *Led i Sneg*, 2018, Vol. 58, No. 3, pp. 373–386 (in Russian).
 14. Acker J. G., Leptoukh G., Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data, *Eos, Trans. AGU*, 2007, Vol. 88, No. 2, pp. 14–17, DOI: 10.1029/2007EO20003.
 15. Eastwood S., Lavergne T., Tonboe R., Hackett B., *Product user manual for reprocessed sea ice concentration from EUMETSAT OSI SAF SEAICE_GLO_SEAICE_L4_REP_OBSERVATIONS_011_009, Version 2.4*, Copernicus, 2016, 45 p.
 16. Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Shiganova T. A., The Azov Sea, In: *The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry*, A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev (eds.), Vol. 5: Water Pollution, Pt. 5Q, Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2008, pp. 63–90.
 17. Lavrova O. Yu., Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Bocharova T. Yu., Interannual variability of ice cover in the Caspian Sea, *J. Hydrology X*, 2022, Vol. 17, Article 100145, <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100145>.
 18. *MERRA-2 statD_2d_slv_Nx: 2d, Daily, Aggregated Statistics, Single-Level, Assimilation, Single-Level Diagnostics V5.12.4, Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015)*, Greenbelt, MD, USA: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2015, DOI: 10.5067/9SC1VNTWGWV3 (accessed: 06.11.2023).