Спутниковый мониторинг ледяного покрова в районе Керченского пролива

А. Г. Костяной^{1,2}, Е.А. Костяная¹, О.Ю. Лаврова³

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

² Московский университет им. С. Ю. Витте, Москва, 115432, Россия

³ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Приведены результаты спутникового мониторинга ледяного покрова Азовского моря, и в частности Керченского пролива и Таганрогского залива. Мониторинг вёлся на основе ежедневных радиолокационных изображений (РЛИ) морской поверхности радаром с синтезированной апертурой С-диапазона SAR-С (англ. Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1А/В с пространственным разрешением 20 м. За январь – март 2021 г. было получено и проанализировано 77 РЛИ, а с декабря по март 2022 г. — 56 РЛИ для района Керченского пролива и 52 РЛИ для района Таганрогского залива. Показано, что в эти две зимы лёд фактически отсутствовал в районе Керченского пролива и образовывался только в Таганрогском зал. — самом холодном районе Азовского моря. Отсутствие льда в Керченском проливе подтверждается относительно высокой температурой воздуха в зимний период над тем же районом. Анализ состояния ледяного покрова Азовского моря с 1980 по 2020 г. показал значительную межгодовую изменчивость с резким уменьшением ледяного покрова после зимы 2017 г. Это объясняется ростом температуры воздуха в зимний период: например, среднемесячная температура воздуха в районе Керченского пролива не опускалась ниже нуля с зимы 2012 г. По данным атмосферного реанализа MERRA-2 (англ. Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications), с января 2010 г. по сентябрь 2022 г. среднемесячная температура воздуха в районе Керченского пролива росла со скоростью примерно 1 °C за десять лет, что вдвое превышает тренд, рассчитанный для периода 1980–2020 гг.

Ключевые слова: Чёрное море, Азовское море, Керченский пролив, Таганрогский залив, Крымский мост, ледяной покров, температура воздуха, спутниковые изображения, спутниковый мониторинг, спутниковая радиолокация

Одобрена к печати: 23.11.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-195-204

Введение

Керченский пролив играет важную роль в водообмене между Азовским и Чёрным морями, является важным транспортным коридором для морских перевозок, а также обладает большим военно-стратегическим значением. Строительство и открытие Крымского моста через Керченский пролив в мае 2018 г. придало этому району ещё большую значимость. Крымский мост состоит из двух параллельных магистралей, автомобильной и железнодорожной, общей протяжённостью 19 км. Пролёты эстакад, длина которых варьируется от 55 до 63 м, стоят на 595 опорах, часть из которых установлены в море. Самый длинный судоходный пролёт над Керчь-Еникальским каналом проходит по аркам автодорожного и железнодорожного мостов длиной 227 м. При проектировании моста были приняты беспрецедентные меры для исключения его воздействия на морские экосистемы.

Необходимо отметить, что современный интерес к изучению течений и водообмена в Керченском проливе возник уже в 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 (Щербак и др., 2007). В феврале 2017 г. Лупян Е.А. с коллегами (2017) по спутниковым данным обнаружили, что опоры Крымского моста (даже в самой широкой судоходной части) не пропускают лёд из Азовского моря в Чёрное (*рис. 1*, см. с. 196), чего не наблюдалось до его строительства (Лаврова и др., 2017). Эти обстоятельства свидетельствуют о необходимости тщательного исследования гидродинамических и гидрофизических процессов, протекающих в данном районе, включая пространственно-временные характеристики ледяного покрова.



Рис. 1. Фрагмент цветосинтезированного изображения Керченского пролива в районе Крымского моста MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2A от 13 февраля 2017 г. Лёд проявляется в голубых тонах

Щербак С.С. с коллегами (2007) организовали комплексный спутниковый мониторинг района Керченского пролива, основывающийся на спутниковых изображениях в оптическом, инфракрасном (ИК) и микроволновом диапазонах (AVHRR (*англ*. Advanced Very High Resolution Radiometer) NOAA (*anen*. National Oceanic and Atmospheric Administration – Haunoнальное управление океанических и атмосферных исследований, США), MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua/Terra, MERIS (ahea. Medium Resolution Imaging Spectrometer) Envisat, ASAR (anen. Advanced Synthetic Aperture Radar) Envisat u SAR (англ. Synthetic Aperture Radar) ERS-2 (англ. European Remote Sensing), и показали, 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. 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).

В работе (Дашкевич и др., 2016) на основе моделирования, наблюдений в портах и спутниковых снимков показано, 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 за весь период наблюдения 1885–2015 гг. зиму 1953/1954 гг. ледовитость достигала примерно 68% (Яицкая, Магаева, 2018). В зиму 2002/2003 гг., которая, по оценкам Яицкой Н.А. и Магаевой М.А. (2018), была в Азовском море даже более суровая, чем зима 2011/2012 гг., ледовитость доходила до 45%. Наибольшая толщина льда в Азовском море — до 50 см — наблюдается в Таганрогском заливе.

Яицкая Н.А. и Магаева М.А. (2018) показали, что в период с 1950 до 2015 г. начало ледового периода в портах Азовского моря в среднем смещалось в сторону более поздних дат, а конец — в сторону более ранних. Так, начало ледостава в Таганроге сместилось в среднем на месяц — 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 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 по 2015 г. сократилась примерно на месяц-полтора.

Авторы работы (Гинзбург и др., 2021) для исследования межгодовой изменчивости ледяного покрова Азовского моря использовали среднемесячные значения концентрации льда за период 1980–2020 гг. по данным европейского агентства 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. выросло количество зим со среднемесячной ледовитостью менее 10 %, что соответствует увеличению в эти годы числа мягких зим (Гинзбург и др., 2021). Данный факт 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 %.

С 2021 г. в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН выполняется 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. Составная часть данного проекта — спутниковый мониторинг ледяного покрова в зимний период. В статье представлены предварительные результаты этого исследования.

Анализ спутниковых радиолокационных изображений и сопутствующей метеорологической информации

С 1 января по 1 апреля 2021 г. проведён ежедневный мониторинг ледяного покрова Азовского моря и Керченского пролива с помощью радара с синтезированной апертурой (PCA, SAR-C), установленного на спутниках Sentinel-1A/B Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency — ESA). Всего было получено и обработано 77 спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) Азовского моря с пространственным разрешением 20 м. Особое внимание было уделено Керченскому проливу (тема проекта) и Таганрогскому зал. (место, где наблюдалось наибольшее скопление льда). Поскольку зима 2020/2021 гг. была очень тёплой в регионе Азовского моря (*puc. 2*, см. с. 198), на большей части его акватории лёд не образовался, в том числе в Керченском проливе, расположенном на его южной периферии (*puc. 3, 4*, см. с. 198). По этой причине использование оптических данных среднего пространственного разрешения (например, с MODIS Aqua/Terra, 250–1000 м) не имело смысла.



Рис. 2. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячной температуры воздуха на высоте 2 м в Керченском проливе по данным атмосферного реанализа MERRA-2 с января 2010 г. по сентябрь 2022 г. Синей линией показан линейный тренд



Рис. 3. Композит спутниковых радиолокационных изображений ледяного покрова в северной части Азовского моря за 20–22 февраля 2021 г. (SAR-C Sentinel-1; ©ESA, 2021)



Рис. 4. Спутниковое радиолокационное изображение Керченского пролива от 25 февраля 2021 г. (SAR-C Sentinel-1; ©ESA, 2021). Белые точки — скопление судов в Керченском проливе

Первый лёд в Азовском море появился вдоль северного побережья Таганрогского зал. 6 февраля 2021 г. К 22 февраля ледяной покров в виде плавучего льда занял залив полностью и распространился вдоль северного побережья на запад и вдоль восточного побережья на юг (см. *рис. 3*). В это время наблюдалось максимальное покрытие льдом Азовского моря, после чего началось постепенное его таяние, которое закончилось к 16 марта 2021 г., когда лёд полностью исчез с акватории Таганрогского зал. В районе Керченского пролива полосы шуги наблюдались с 19 по 27 февраля 2021 г., при этом только 25 февраля они были достаточно протяжёнными и доходили до Крымского моста (см. *рис. 4*). В другие дни тонкий лёд был замечен только в прибрежной зоне мелководных лиманов в восточной части пролива.

Зимой 2021/2022 гг. ежедневный спутниковый мониторинг ледяного покрова Азовского моря проводился с 1 декабря 2021 г. по 31 марта 2022 г. Поскольку эта зима была ещё теплее предыдущей (см. *рис. 2*), мониторинг вёлся отдельно для Керченского пролива (56 РЛИ SAR Sentinel-1A/B) и Таганрогского зал. (52 РЛИ), где лёд в незначительном количестве и был обнаружен. Большая часть акватории Азовского моря, как и предыдущей зимой, оставалась безо льда. Первый лёд появился в крайней восточной части Таганрогского зал., между Таганрогом и дельтой Дона, 25 декабря 2021 г. К 29 декабря ледяной покров стал распространяться на запад вдоль северного побережья залива, 30 декабря он отошёл от берега и разрозненные ледяные поля дрейфовали в середине залива (*рис. 5*). Затем он стал таять и к 6 января оставался только в узкой прибрежной полосе между Таганрогом и дельтой Дона. Следующая стадия нарастания льда наблюдалась 22 января 2022 г., когда тонкий лёд снова стал распространяться на запад вдоль северного побережья залива. 23 января он вновь оторвался от берега, и к 27 января дрейфующие льды заняли практически всю акваторию Таганрогского зал. (*рис. 6*, см. с. 200).



Рис. 5. Спутниковое радиолокационное изображение ледяного покрова в Таганрогском зал. 30 декабря 2021 г. (SAR-C Sentinel-1; ©ESA, 2021). Лёд проявляется в виде серых полос и пятен на фоне чёрного фона акватории залива в штилевых условиях

Затем началось интенсивное таяние льда, и ко 2 февраля сплочённый лёд наблюдался только у северного берега залива. К 4 февраля он вновь оторвался от берега, а к 11 февраля практически весь растаял. После 20 февраля лёд в Таганрогском зал. уже не наблюдался нигде.



Рис. 6. Спутниковое радиолокационное изображение ледяного покрова в Таганрогском зал. от 27 января 2022 г. (SAR-C Sentinel-1; ©ESA, 2022)



Рис. 7. Спутниковое радиолокационное изображение Керченского пролива от 28 января 2022 г. (SAR-C Sentinel-1; ©ESA, 2021). Корабли в Керченском проливе проявляются в виде многочисленных белых точек



Рис. 8. Среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м в Керченском проливе по данным атмосферного реанализа MERRA-2 с 1 декабря 2021 г. по 31 матра 2022 г.

В районе Керченского пролива зимой 2021/2022 гг. лёд не наблюдался ни в конце декабря, ни в конце января даже в прибрежной зоне мелководных лиманов в восточной части пролива (*puc.* 7, см. с. 200). Это объясняется очередной тёплой зимой, когда среднемесячная температура воздуха не опускается ниже нуля (см *puc.* 2). Если рассмотреть изменчивость среднесуточной температуры в районе Керченского пролива (*puc.* 8), то окажется, что с 1 декабря 2021 г. по 31 марта 2022 г. среднесуточная температура опускалась незначительно ниже нуля всего шесть раз, причём эти события были кратковременными (1–2 дня), и только в двух случаях температура опускалась до -3 °C (см. *puc.* 8). Этого было явно недостаточно для образования даже тонкого льда.

Заключение

Спутниковый мониторинг ледяного покрова в Азовском море показал его фактическое отсутствие в районе Керченского пролива зимой 2020/2021 и 2021/2022 гг., тем самым подтвердил продолжающееся потепление климата в регионе Азовского моря (Гинзбург и др., 2021). Согласно последним данным, представленным в Третьем оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, температура воздуха и воды в районе Керченского пролива растёт со скоростью примерно 0,5 °C за десять лет по данным за 1980–2020 гг. (Гинзбург и др., 2021; Костяной и др., 2022). Однако если мы обратимся к *рис. 2*, то по данным за 2010–2022 гг. этот тренд для температуры воздуха увеличился вдвое — примерно до 1 °C за 10 лет. Неудивительно, что площадь ледяного покрова в Азовском море с зимы 2011/2012 гг. постоянно сокращается (рис. 9, см. с. 202). А после зимы 2016/2017 гг., когда лёд покрывал почти половину акватории Азовского моря (*рис. 10*, см. с. 202), он наблюдается только в мелководном Таганрогском зал., площадь которого составляет лишь 14 % от акватории всего Азовского моря. Присутствие льда именно в этом районе объясняется несколькими факторами: 1) это самый холодный район Азовского моря; 2) это мелководный район со средней глубиной 4,9 м; 3) это наиболее распреснённый район за счёт стока рек Дон, Кальмиус, Миус и Ея.

Если мы сравним *puc. 2 и 9*, то обратим внимание на значительную межгодовую изменчивость площади ледяного покрова, например зимой 2011/2012, 2013/2014 и 2016/2017 гг. по сравнению с другими годами в последнее десятилетие, что не так очевидно в данных зимней среднемесячной температуры, где соответствующая изменчивость существенно меньше выражена (см. *puc. 2*). Это объясняется сложностью процесса ледообразования в мелководном море в условиях достаточно высокой температуры воды и воздуха, когда существенно влияют такие факторы, как скорость и направление ветра, высота и направление волн, солёность морских вод, стратификация вод, течения, сейшевые и инерционные колебания, интенсивность испарения, фактическая инсоляция и др.



Рис. 9. Межгодовая изменчивость среднемесячной концентрации льда в Азовском море (%) за 1980–2020 гг. Красная прямая линия — линейный тренд (-1,2 % за 10 лет) этих изменений (Гинзбург и др., 2021)



Рис. 10. Проявление ледяного покрова Азовского моря на цветосинтезированном изображении OLCI (*англ.* Ocean and Land Colour Instrument) Sentinel-3A от 17 февраля 2017 г. (©ESA, 2017)

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 21-17-00191 (2021-2023) «Мониторинг водообмена через Керченский пролив на основе современных методов наблюдений и численного моделирования». Авторы благодарят Соловьева Д. М. (Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь) за помощь в оформлении оптических спутниковых изображений.

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: 10.31857/S003015742106006X.
- 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-91-100.
- 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. Морские природные системы // Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. С. 192–238.
- 4. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
- 5. 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.
- 6. 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.
- 7. *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.
- 8. *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. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-3-373-386.
- 9. *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.
- 10. *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. Art. No. 100145. 14 p. https://doi.org/10.1016/j. hydroa.2022.100145.

Satellite monitoring of the ice cover in the area of the Kerch Strait

A. G. Kostianoy^{1,2}, E. A. Kostianaia¹, O. Yu. Lavrova³

 ¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences Moscow 117997, Russia E-mails: kostianoy@gmail.com, janekost@mail.ru
² Moscow Witte University, Moscow 115432, Russia
³ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

The article presents the results of satellite monitoring of the ice cover of the Sea of Azov and the Kerch Strait and the Taganrog Bay in particular. Monitoring was carried out on the basis of daily radar images (RI) of the sea surface acquired by Sentinel-1A/B SAR-C (Synthetic Aperture Radar) with a spatial resolution of 20 m. In January-March 2021, 77 radar images were received and analyzed, and from December to March 2022 — 56 radar images for the Kerch Strait area and 52 radar images for the Taganrog Bay region. It is shown that in these two winters, ice was actually absent in the area of the Kerch Strait and formed only in the Taganrog Bay, which is the coldest area of the Sea of Azov. The absence of ice in the Kerch Strait is confirmed by the relatively high air temperature in winter over the same area. An analysis of the interannual variability of the ice cover of the Sea of Azov from 1980

to 2020 showed significant interannual variability with a sharp decrease in ice cover after the winter of 2017. This is due to an increase in air temperature in winter, for example, the average monthly air temperature in the Kerch Strait area has not dropped below zero since the winter of 2012. According to the MERRA-2 (Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications) atmospheric reanalysis, from January 2010 to September 2022, the average monthly air temperature in the Kerch Strait area of about 1 °C per ten years, which is twice the trend calculated for the period 1980–2020.

Keywords: Black Sea, Sea of Azov, Kerch Strait, Taganrog Bay, Crimean Bridge, ice cover, air temperature, satellite images, satellite monitoring, satellite radar imagery

Accepted: 23.11.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-195-204

References

- 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), *Oceanology*, 2021, Vol. 61, No. 6, pp. 745–756, DOI: 10.1134/S0001437021060060.
- 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, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 91–100 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-91-100.
- 3. Kostianoy A.G., Eremina T.R., Ivanov V.V., Lobanov V.B., Krovnin A.S., Amosova V.M., Afanas'ev 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., Mikhailova A.V., Razinkov V.P., Rostov I.D., Serykh I.V., Trusenkova O.O., Ustinova E.I., Khen G.V., Marine natural systems, *Tretii otsenochnyi doklad Rosgidrometa 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. 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).
- 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, *Sovremennye 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.
- 6. 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, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmo-sa*, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 247–251 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-247-251.
- 7. 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, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Issue 4, Vol. 1, pp. 376–383 (in Russian).
- 8. Yaitskaya N.A., Magaeva A.A., Dynamics of the ice regime of the Sea of Azov in the XX–XXI centuries, *Led i sneg*, 2018, Vol. 58, No. 3, pp. 373–386 (in Russian).
- 9. 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.
- 10. 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, Art. No. 100145, 14 p., https://doi.org/10.1016/j. hydroa.2022.100145.