

Спутниковый мониторинг ледяных торосистых образований Азовского моря в 2015–2024 гг.

А. А. Магаева

Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, 344006, Россия
E-mail: a.magaeva@mail.ru

Особенность ледовых условий Азовского моря — активное торошение льда, в результате которого образуются ледяные торосистые образования (ЛТО): торосы и барьеры торосов, а в некоторых случаях — стамухи. Эти ледяные образования могут препятствовать судоходству, нарушать безопасную эксплуатацию морских и прибрежных инженерных и гидротехнических сооружений. Ввиду активной морехозяйственной деятельности в Азовском море и климатических изменений крайне важно иметь актуальную информацию о локализации ЛТО. Настоящая статья посвящена спутниковому мониторингу ЛТО Азовского моря в период 2015–2024 гг. Для их обнаружения применена методика Арктического и Антарктического научно-исследовательского института, в рамках которой проводится последовательный анализ радиолокационных и оптических снимков совместно с гидрометеорологическими данными, батиметрией и исторической информацией о местоположении ЛТО. В данной работе были использованы радиолокационные снимки SAR-C (*англ.* Synthetic Aperture Radar, C-band) Sentinel-1A и снимки видимого диапазона MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2, OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8, -9, пространственное разрешение которых 10–30 м. Всего использовано 105 спутниковых снимков, анализ и работа с ними проводилась с помощью сервиса «Vega-Science» Центра коллективного пользования Института космических исследований РАН. Спутниковый мониторинг позволил получить новые данные о ЛТО Азовского моря — площадь, поперечную длину, а также сроки образования и разрушения. Всего обнаружено 642 объекта, площадь которых варьируется от 5963 до 11 125 м². Продолжающееся в 2015–2024 гг. сокращение ледовитости Азовского моря (среднее значение составляет 9,2 %, что меньше как среднемноголетнего значения 1950–2024 гг., так и климатической нормы 1991–2020 гг.) обусловило местоположение ЛТО — они расположены преимущественно в Таганрогском заливе на глубине 0,5–2,5 м, период наблюдения — в среднем около 30 дней. Однако в отдельные зимы ЛТО с большей площадью льда могут образовываться в открытом море и у входа в Керченский пролив (например, в зимы 1953/54, 1955/56 гг. и др.).

Ключевые слова: ледяные торосистые образования, торосы, стамухи, морской лёд, ледовитость, Азовское море, Таганрогский залив, спутниковый мониторинг

Одобрена к печати: 13.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-256-266

Введение

Азовское море — мелководная акватория, физико-географические особенности которой — низкая солёность, рельеф дна и берегов, замкнутость и удалённость от Мирового океана — обуславливают уникальность происходящих природных процессов и явлений. В XX — начале XXI в. флуктуации климата привели к перестройке гидрологического режима Азовского моря — наблюдается рост положительных аномалий температуры воздуха и воды, увеличение солёности, изменение ветро-волновой активности (Бердников и др., 2022; Дашкевич и др., 2017; Матишов и др., 2021). В климатический период 1991–2020 гг. произошёл режимный сдвиг ледового сезона Азовского моря — ледовитость сократилась на 6 %, продолжительность ледового сезона — на 11 дней по сравнению со среднемноголетними значениями для периода 1950–2020 гг. (Магаева, 2022).

Морской лёд выступает не только индикатором климатических изменений, но и лимитирующим фактором морехозяйственной деятельности, планирование и безопасность которой зависят от площади, толщины, сроков образования и разрушения льда. Экстремальные ледовые явления крайне усложняют судоходство, нарушают работу гидротехнических сооружений и могут стать причиной катастроф в портовых комплексах, районах добычи и транспор-

тировки углеводородов, на мостовых переправах. Например, в январе 2008 г. около 150 судов ожидало ледокольной проводки у кромки льда в Керченском проливе. Ледовое обеспечение осуществляли три ледокола, которые не справились с потоком скопившихся у кромки льда судов (<https://meteoinfo.ru/novosti/4769-02032012>). Поэтому ежегодный мониторинг ледовых условий Азовского моря представляется чрезвычайно важной задачей не только для получения новых фундаментальных знаний о природных процессах в условиях изменения климата, но и для отраслей экономики и хозяйства.

Регулярный авиамониторинг за ледяным покровом Азовского моря был организован в начале 1950-х гг. Первые результаты за 10-летний период обобщены в виде «Атласа льдов Чёрного и Азовского морей» (Атлас..., 1962). Позднее они публиковались в обобщающих гидрометеорологических справочниках (Гидрометеорологические..., 1986; Гидрометеорологический..., 1962; Гидрометеорология..., 1991), в которых дано подробное описание ледовых условий Азовского моря и факторов их определяющих. В начале 1990-х гг. авиамониторинг был прекращён. Регулярные наблюдения возобновились лишь в начале XXI в., когда стали широко доступны данные ДЗЗ из космоса.

С начала 2000-х гг. НИЦ «Планета» и ЕСИМО (Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане) проводят спутниковый мониторинг ледовых условий Азовского моря и еженедельно выпускают оперативные карты-схемы ледяного покрова в течение ледового сезона. Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ) выпускает пространственные данные ледяного покрова в международном формате SIGRID-3 (архивный формат для геопривязанной векторной информации о морском льде). Также мониторинг ледяного покрова Азовского моря проводит Институт космических исследований РАН, уделяя особое внимание Керченскому проливу (Лаврова и др., 2017; Лупян и др., 2017). Так, анализ спутниковых данных высокого пространственного разрешения, показал, 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* (Костяной и др., 2023).

Однако без должного внимания остались вопросы торошения льда Азовского моря. Под воздействием ветров любых направлений силой более 7–10 м/с (Думанская, 2014) лёд взламывается и торосится, в результате чего образуются ледяные торосистые образования (ЛТО): торосы и барьеры торосов, а в некоторых случаях — стамухи. Информация об этих явлениях отрывочно представлена в научных изданиях прошлого века, а данные получены в ходе единичных экспедиционных исследований. Например, карты распределения торосистого льда в Азовском море для различных типов зим, представленные в публикации (Атлас..., 1962), приведены для фактически наблюдавшихся условий, так как многолетние наблюдения на тот момент отсутствовали. В работе (Гидрометеорология..., 1991) представлена схема зон торосистости льда Азовского моря по данным прибрежных пунктов и судовых наблюдений.

Цель настоящей работы — на основе спутниковых данных высокого разрешения выполнить мониторинг и анализ ЛТО Азовского моря для современных гидроклиматических условий 2015–2024 гг.

Материалы и методы

Спутниковый мониторинг ледяных торосистых образований регулярно проводится для арктических морей (Горбунов и др., 2007, 2008; Платонова, Бычкова, 2018; Смирнов и др., 2019) по методике ААНИИ, в рамках которой осуществляется последовательный анализ радиолокационных и оптических снимков совместно с гидрометеорологическими данными, батиметрией и исторической информацией о местоположении ЛТО. Обнаружение объектов осуществляется на основе прямых дешифровочных признаков, позволяющих идентифицировать ЛТО по данным ДЗЗ. К ним относятся: характерная текстура, форма (как правило искривлённая) и неизменность местоположения ЛТО на протяжении длительного периода (Обнаружение..., 2017). Алгоритм обнаружения ЛТО подробно описан в работе

(Обнаружение..., 2017). Данная методика также была успешно применена для условий Северного Каспия (Нестеров и др., 2023; Sigitov et al., 2019).

В ходе настоящей работы методика апробирована для условий Азовского моря. Для обнаружения ЛТО были использованы радиолокационные снимки SAR-C (*англ.* Synthetic Aperture Radar, C-band) Sentinel-1A и спутниковые снимки видимого диапазона MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2, OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8, -9, пространственное разрешение которых 10–30 м. Анализ спутниковых данных проводился с помощью сервиса «Вега-Science» Центра коллективного пользования Института космических исследований РАН (Loupian et al., 2022). При работе с радиолокационными снимками были использованы оптико-радарные композиты (комбинация поляризаций VH:VV:VH/VV или HV:HH:HV/HH (V, *англ.* vertical; H, *англ.* horizontal)), а с оптическими — продукт «Льды и снег» (комбинация каналов 7:5:4 Landsat-8, -9 и 1:5:4 Sentinel-2). Всего проанализировано 105 спутниковых снимков. При обнаружении ЛТО фиксировались координаты местоположения, а также даты образования и разрушения. Полученные результаты были импортированы в геоинформационную систему «Ледовый режим южных морей России» (Магаева и др., 2015), которая содержит данные о характеристиках ледяного покрова Азовского и Каспийского морей за период с 1916 по 2024 г. — положение кромки льда, сплочённость льда, сроки образования и разрушения льда и т.д., а также исторические данные о местоположении ЛТО за период 1953–1990 гг.

Далее, был выполнен пространственный анализ данных — рассчитана площадь ЛТО, поперечная длина. Для оценки местоположения ЛТО была использована цифровая модель рельефа дна Азовского моря (Магаева, Третьякова, 2015; Матишов, 2006), в основе которой карты батиметрии различного масштаба.

Локализация ЛТО зависит от степени суровости зимы и развития ледяного покрова на акватории (Бухарицин, 1984; Ogorodov et al., 2020). Для оценки степени суровости температурных условий, обуславливающих состояние ледяного покрова, рассчитаны суммы градусо-дней мороза (СГДМ, °С) путём сложения всех значений отрицательной температуры воздуха за зимний период. Далее по предлагаемым градациям был определён тип зимнего периода — суровый, умеренный или мягкий. В настоящей работе использованы данные наблюдений на гидрометеорологической станции (ГМС) Таганрог — отрицательная температура воздуха за период декабрь — март, полученная из открытого архива ВНИИ Гидрометеорологической информации — Мировой центр данных (meteo.ru) (Булыгина и др., 2014) и сайта «Расписание погоды» rp5.ru (<https://rp5.ru/>).

Для анализа площади льда (ледовитости) Азовского моря использованы схемы ледовой обстановки по данным спутниковых снимков, полученные из архива региональных ледовых карт ААНИИ (доступен в рамках электронного каталога Мирового центра данных по морскому льду (<http://wdc.aari.ru/datasets/d0004>)). Схемы представлены классами пространственных объектов, содержащими полигоны воды и ледяного покрова с разными характеристиками — атрибутивная информация включает конкретные значения сплочённости льда, возрастные характеристики (толщина), формы плавучего льда и т.д. За период 2015–2024 гг. получено и обработано 143 файла.

Результаты и обсуждение

Ледовые условия Азовского моря тесно связаны с СГДМ над морем за зимний сезон (Гидрометеорологические..., 1986). В связи с этим температурные условия зим подразделяют на три типа: мягкие — СГДМ до -200 °С, умеренные — в пределах от -200 до -400 °С и суровые — от -400 °С (Дьяков и др., 2015).

Рассматриваемый период 2015–2024 гг. характеризуется преимущественно умеренными температурными условиями — согласно классификации выделены одна суровая, пять умеренных и четыре мягкие зимы. Значение СГДМ варьируется от $-524,4$ до $-57,2$ °С. Среднее значение ледовитости при этом составляет 9,2 %, что меньше как среднемноголетнего значе-

ния 1950–2024 гг., так и климатической нормы 1991–2020 гг. (табл. 1). Максимальная площадь льда, отмеченная за сезон, варьируется от 7 до 100 % от всей площади Азовского моря. При этом в последние 5 лет, начиная с 2019 г. максимальная ледовитость в среднем составляет 14,5%. Полное замерзание Азовского моря было отмечено единожды, в суровую зиму 2016/2017 г. (рис. 1). Таким образом, тенденция сокращения площади льда с начала 1990-х гг. (Магаева, 2022) продолжается по настоящее время.

Таблица 1. Многолетние изменения СГДМ и ледовитости Азовского моря

Период, гг.	СГДМ (ГМС Таганрог), °С	Ледовитость, %
1950–2024	–549,0	27,8
1991–2020	–459,6	27,1
2015–2024	–261,7	9,2

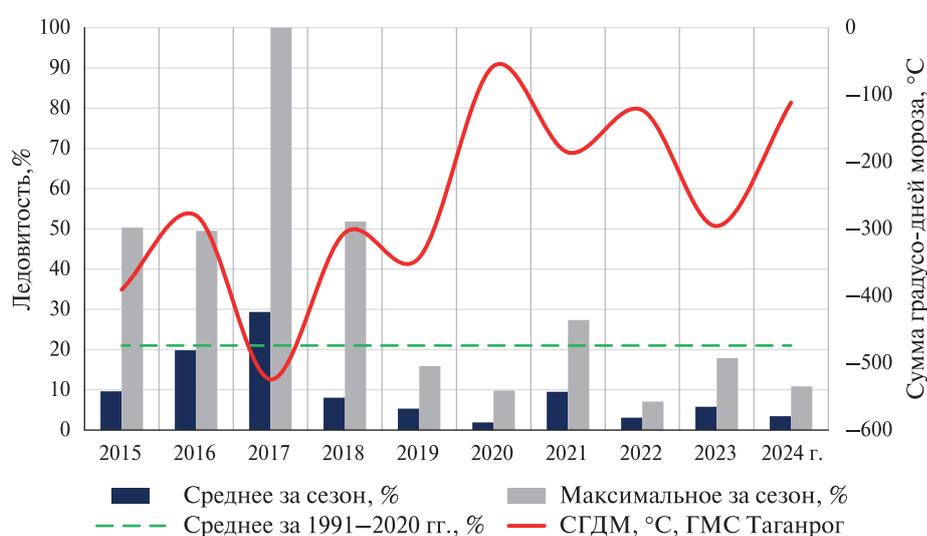


Рис. 1. Динамика сумм градусо-дней мороза по данным гидрометеорологической станции Таганрог и ледовитости Азовского моря за 2015–2024 гг.

Таблица 2. Статистические параметры ледовых условий и ЛТО Азовского моря за 2015–2024 гг.

Параметр/Значение	Минимальное	Максимальное	Среднее
Ледовитость, %	1,9	29,3	9,6
СГДМ, °С (ГМС Таганрог)	–57	–524	–253
Площадь ЛТО, м ²	5963	11 125	8864
Длина ЛТО, м	141	304	205
Продолжительность наблюдения ЛТО, дни	19	60	32
Глубина, м	1,1	2,28	1,8

Несмотря на это, практически ежегодно в Азовском море образуются ледяные торосистые образования. В ходе спутникового мониторинга за период 2015–2024 гг. обнаружено 642 объекта, которые расположены преимущественно в Таганрогском заливе на глубине от 0,5 до 2,5 м (рис. 2, см. с. 260). Ледяные торосистые образования сосредоточены в вершине залива, в районах банок Чумбурская, Сазальницкая и банки Песчаных островов, а также в окрестностях подводного продолжения кос Петрушинская, Беглицкая, Очаковская и у западной стороны Кривой косы. Единичные объекты расположены в районах Белосарайской и Глафиоровской кос, а также банок Еленина, Железинская и Арабатской

косы (западная часть моря). Период наблюдения объектов в среднем составил около 30 дней — со второй декады января до третьей декады февраля. Как правило, в этот период ледяной покров Азовского моря достигает наибольшего развития. Согласно полученным результатам, площадь ЛТО варьируется от 5963 до 11 125 м², поперечная длина — от 141 до 304 м (табл. 2).

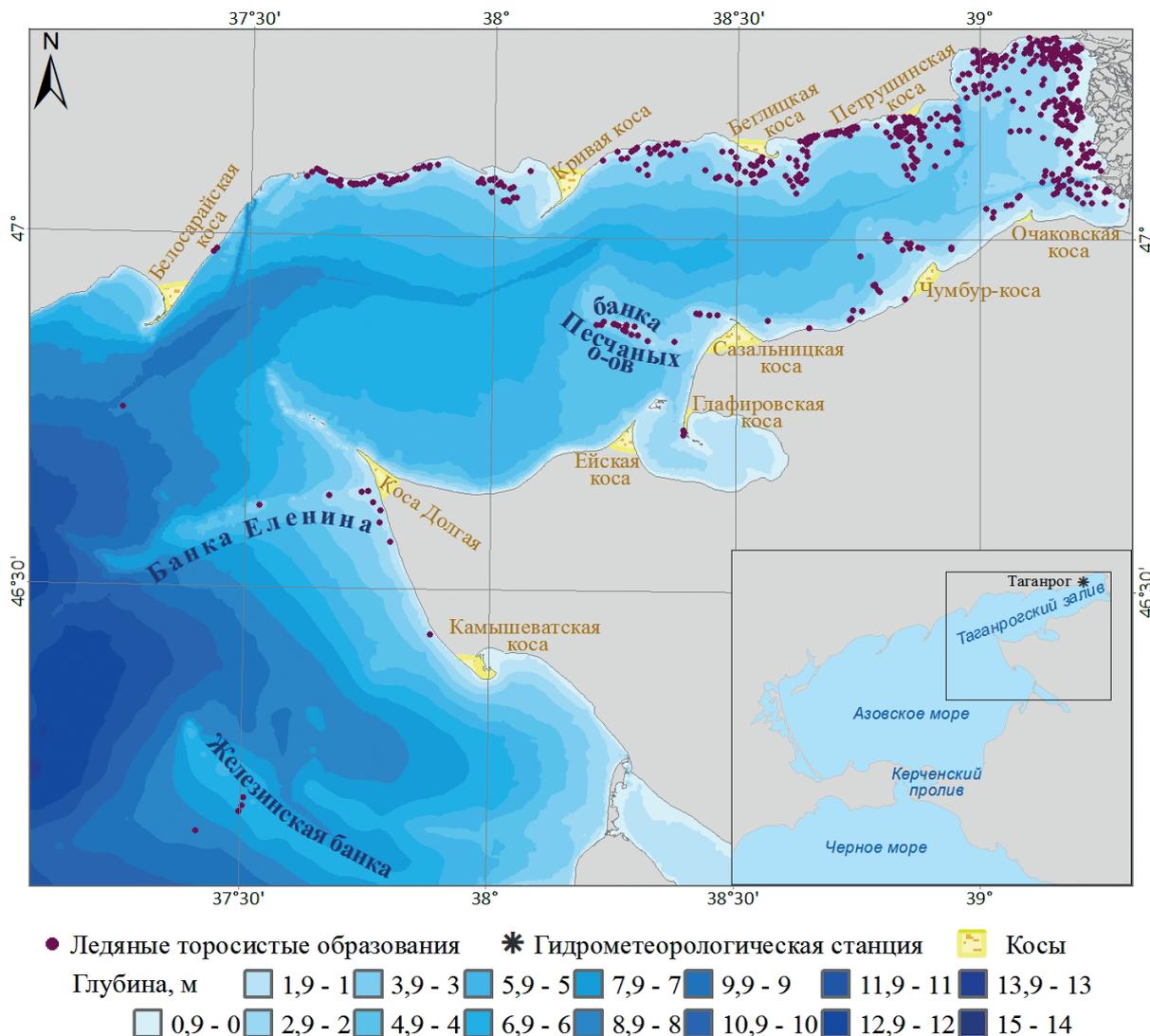


Рис. 2. Ледяные торосистые образования Азовского моря в 2015–2024 гг.

Наибольшее число ЛТО обнаружено в зиму 2016/2017 г. (рис. 3, см. с. 261). Это самый ледовитый сезон за весь исследуемый период: среднесезонная ледовитость составила 29,3 %, продолжительность ледового сезона — 96 дней, из которых в течение 60 дней наблюдались ЛТО. Обнаруженные объекты имели неизменное местоположение с конца декабря до первых чисел марта. В самую мягкую зиму 2019/2020 г. ЛТО не наблюдались.

На рис. 3 представлен пример мониторинга двух ЛТО, наблюдавшихся с 13 декабря 2016 по 7 марта 2017 г. Объекты расположены в северо-восточной части Таганрогского залива на глубине 1,6 м (см. рис. Зв, № 2) и 2,2 м (см. рис. Зв, № 1). Размеры ЛТО составляют около 5 тыс. м² (см. рис. Зв, № 2) и 10 тыс. м² (см. рис. Зв, № 1).

Спутниковый мониторинг на основе данных ДЗЗ высокого разрешения позволил выявить основные зоны скопления ЛТО в современный период и получить новые данные об их пространственно-временных характеристиках.

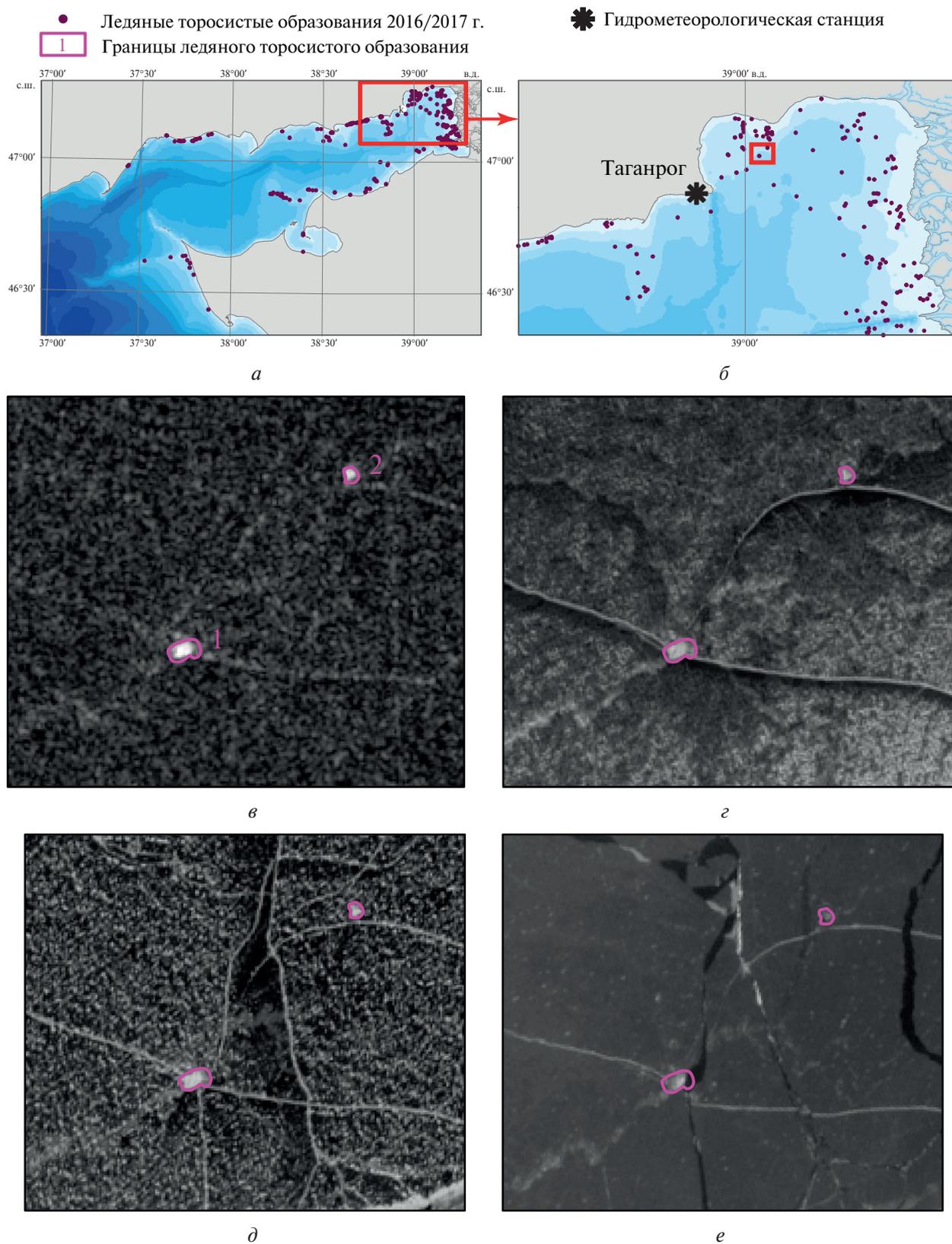


Рис. 3. Пример мониторинга ЛТО Азовского моря в зимний сезон 2016/2017 г.: а — ЛТО Азовского моря в 2016/2017 г.; б — положение обнаруженных ЛТО на батиметрической карте; в — Sentinel-1B 25.12.2016 (VV-поляризация); з — Sentinel-2A 04.01.2017; д — Sentinel-2A 31.01.2017; е — Sentinel-2A 05.03.2017

Статистических данных о ЛТО Азовского моря на сегодняшний день чрезвычайно мало. В основном это карты распределения торосистости льда для фактически наблюдавшихся условий прошлого столетия. В более ранних работах (Гидрометеорологические..., 1986; Гидрометеорология..., 1991) отмечено большое количество ЛТО повсеместно вдоль берега, в особенности у восточной стороны кос северного берега и вдоль Арабатской стрелки, что объясняется сильной изрезанностью береговой линии, а также неоднократными вскрытиями и замерзаниями льда. В Таганрогском заливе местоположение и характер торосов непостоянны, но особенно сильное торошение происходит у отмелей и кос (Гидрометеорологические..., 1986). В открытой части Азовского моря наибольшая торосистость и максимальное число барьеров торосов образовывалось в юго-западной части моря, что связано с преобладающим выносом льда в этот район (Атлас..., 1962; Гидрометеорологические..., 1986).

На современном этапе, характеризующемся сокращением ледовитости, образование ЛТО происходит преимущественно в Таганрогском заливе. У северного побережья моря (от Мариуполя до Геническа) и в юго-западной части объекты не обнаружены. Однако в отдельные суровые и умеренные зимы ледяные торосистые образования могут образовываться у входа в Керченский пролив. Высота торосов в открытых частях северной части пролива, как правило, не превышает 1–2 м; на прибрежных отмелях косы Остров Тузла торосистые нагромождения иногда достигают 5–12 м (Дьяков и др., 2019). По данным исследования (Лаврова и др., 2017) Крымский мост может создать блокирующий эффект для естественного дрейфа льда, что впоследствии приведёт к образованию торосов и стамух на мелководье, что в свою очередь создаст дополнительную опасность для моста.

Результаты спутникового мониторинга ЛТО Азовского моря совместно с историческими данными позволяют получать актуальную информацию об их локализации при различных гидроклиматических условиях, что повысит безопасность морского природопользования в акватории Азовского моря. На следующем этапе работы будет выполнен геоинформационный анализ и картирование зон скопления ЛТО Азовского моря для суровых ледовитых и современных малоледных условий.

Выводы

1. Проанализированы температурные и ледовые условия Азовского моря за 2015–2024 гг. Сумма градусо-дней мороза (в °С) варьируется от –524,4 до –57,2. Среднее значение ледовитости за исследуемый период составляет 9,2 %, что меньше как среднемноголетнего значения 1950–2024 гг., так и климатической нормы 1991–2020 гг. Тенденция сокращения площади льда Азовского моря продолжается.

2. Для мелководной акватории Азовского моря с сезонным ледяным покровом апробирована методика обнаружения ЛТО, разработанная ААНИИ. Совместное использование радиолокационных и оптических спутниковых снимков высокого разрешения, гидрометеорологических данных, батиметрии и исторических данных о местоположении ЛТО позволило получить новые данные о ЛТО Азовского моря для современных гидроклиматических условий — площадь, поперечную длину, а также сроки образования и разрушения, оценить местоположение обнаруженных объектов.

3. В результате спутникового мониторинга обнаружено 642 ЛТО Азовского моря за 2015–2024 гг., которые расположены преимущественно в Таганрогском заливе на глубине 0,5–2,5 м. Ледяные торосистые образования сосредоточены в вершине залива, в районах банок Чумбурская, Сазальницкая и банки Песчаных островов, а также в окрестностях подводного продолжения кос Петрушинская, Беглицкая, Очаковская и у западной стороны Кривой косы. Единичные объекты расположены в районах Белосарайской и Глафиоровской кос, а также банок Еленина, Железинская и Арабатской косы (западная часть моря). Период наблюдения ЛТО в среднем составляет около 30 дней — со второй декады января до третьей декады февраля, площадь ~11 тыс. м², длина — ~300 м.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-77-00088, <https://rscf.ru/project/24-77-00088/>.

Литература

1. Атлас льдов Черного и Азовского морей. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 120 с.
2. Бердников С. В., Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В. Новое состояние гидрологического режима Азовского моря в XXI веке // Докл. Российской акад. наук. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 1. С. 65–70. DOI: 10.31857/S2686739722030057.
3. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Трофименко Л. Т., Швец Н. В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2014621485 от 10 апреля 2014 г.
4. Бухарицин П. И. Особенности процессов торошения ледяного покрова северной части Каспийского моря // Водные ресурсы. 1984. № 6. С. 115–123.
5. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 3. Азовское море. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 218 с.
6. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 270 с.
7. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5. Азовское море. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 237 с.
8. Горбунов Ю. А., Лосев С. М., Дымент Л. Н. Стамухи Восточно-Сибирского и Чукотского морей // Материалы гляциол. исслед. 2007. Вып. 102. С. 41–47.
9. Горбунов Ю. А., Лосев С. М., Дымент Л. Н. Стамухи моря Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 2(79). С. 111–116.
10. Дашкевич Л. В., Бердников С. В., Кулыгин В. В. Многолетнее изменение средней солёности Азовского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 563–572. DOI: 10.7868/S0321059617040046.
11. Думанская И. О. Ледовые условия морей европейской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.
12. Дьяков Н. Н., Тимошенко Т. Ю., Белогудов А. А., Горбач С. Б. Атлас льдов Черного и Азовского морей. Севастополь: Севастопольское отд-ние ФГБУ «Гос. океанограф. ин-т им. Н. Н. Зубова», 2015. 219 с.
13. Дьяков Н. Н., Фомин В. В., Цвезинский А. С., Липченко А. Е., Лукин Д. В., Полозок А. А., Фомина И. Н., Тимошенко Т. Ю., Белогудов А. А., Левицкая О. В. Современные гидрометеорологические условия формирования ветро-волновых, ледовых и других опасных явлений в Керченском проливе. Севастополь: Росгидромет, Севастопольское отд-ние ФГБУ «Гос. океанограф. ин-т им. Н. Н. Зубова», 2019. 365 с.
14. Костяной А. Г., Костяная Е. А., Лаврова О. Ю., Строчков А. Я. Спутниковый мониторинг ледяного покрова в Азовском море в зимний период 2022/2023 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 276–288. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-276-288.
15. 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.
16. 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.
17. Магаева А. А. Ледовый режим Азовского и Каспийского морей: многолетняя динамика и опасные явления: дис. ... канд. геогр. наук. Ростов н/Д, 2022. 162 с.
18. Магаева А. А., Третьякова И. А. Создание цифровой модели рельефа дна Азовского моря // Экология. Экономика. Информатика: сб. ст. В 3 т. Т. 3. Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов н/Д: Изд-во Южного федер. ун-та, 2015. С. 266–269.
19. Магаева А. А., Яицкая Н. А., Лихтанская Н. В., Дашкевич Л. В. Развитие геоинформационной системы ледового режима южных морей России // Экология, экономика, информатика: сб. ст. В 3 т. Т. 3. Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов н/Д: Изд-во Южного федер. ун-та, 2015. С. 269–275.
20. Матишов Г. Г. Геоморфологические особенности шельфа Азовского моря // Вестн. Южного науч. центра. 2006. Т. 2. № 1. С. 44–48.
21. Матишов Г. Г., Дашкевич Л. В., Кириллова Е. Э. Цикличность климата в Приазовье: голоцен и современный период (XIX–XXI вв.) // Докл. Российской акад. наук. Науки о Земле. 2021. Т. 498. № 5. С. 96–100. DOI: 10.31857/S2686739721050091.

22. *Нестеров Е. С., Максимов А. А., Федоренко А. В.* Анализ ледовых условий на судоходных трассах Каспийского моря // *Гидрометеоролог. исслед. и прогнозы.* 2023. № 4(390). С. 105–117. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-4-105-117.
23. Обнаружение по спутниковым данным опасных ледяных образований вблизи инженерных объектов хозяйственной деятельности на шельфе Арктических морей: метод. пособие / под ред. В. Г. Смирнова. СПб.: ААНИИ, 2017. 75 с.
24. *Платонова Е. В., Бычкова И. А.* Многолетние наблюдения за стамухами Восточно-Сибирского моря с использованием спутниковых данных // *Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та.* 2018. № 53. С. 103–112.
25. *Смирнов В. Г., Бычкова И. А., Михальцева С. В., Платонова Е. В.* Спутниковый мониторинг айсбергов в арктических морях // *Метеорология и гидрология.* 2019. № 4. С. 70–78.
26. *Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A. et al.* Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system // *Remote Sensing.* 2022. V. 14. No. 1. Article 77. 19 p. <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
27. *Ogorodov S. A., Magaeva A. A., Maznev S. V. et al.* Ice features of the Northern Caspian under sea level fluctuations and ice coverage variations // *Geography, Environment, Sustainability.* 2020. V. 13. No. 3. P. 129–138. DOI: 10.24057/2071-9388-2020-77.
28. *Sigitov A., Kadranov Y., Vernyayev S.* Analysis of stamukhi distribution in the Caspian Sea // *Proc. 25th Intern. Conf. “Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions” (POAC 2019).* 2019. 14 p.

Satellite monitoring of ice hummocky formations in the Sea of Azov in 2015–2024

A. A. Magaeva

*Southern Scientific Centre RAS, Rostov-on-Don 344006, Russia
E-mail: a.magaeva@mail.ru*

The Sea of Azov is a shallow water area with seasonal ice cover. The physical and hydrometeorological characteristics of the Sea of Azov contribute to active ice hummocking. As a result, hummocks, ridges and grounded hummocks (stamukhas) are formed. These ice formations are dangerous to maritime shipping and marine and coastal engineering structures. Due to active marine economic activity in the Sea of Azov and regional climate changes, information on the localization of ice hummocky formations is extremely important. This article is dedicated to satellite monitoring of hummocky ice formations in the Sea of Azov in 2015–2024. For this purpose, the methodology for detecting hummocky formations developed by the Arctic and Antarctic Research Institute has been applied. According to the methodology, high-resolution (spatial resolution of 10–30 m) radar and optical satellite images, hydrometeorological data, bathymetry and historical data on the location of ice hummocky formations were used. 105 satellite images were used: radar images from Sentinel-1A SAR-C (Synthetic Aperture Radar, C-band) and visible images from Sentinel-2 MSI (Multispectral Instrument) and Landsat-8, -9 OLI (Operational Land Imager). Analysis and processing of satellite images was carried out using the VEGA-Science web GIS created at Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences. As a result, new data on ice hummocky formations in the Sea of Azov were obtained. These are the area, transverse length and dates of formation and destruction. The location of ice hummocky formations was estimated using the bathymetry of the Sea of Azov and GIS analysis. For 2015–2024, 642 hummocky formations were discovered; the area varied from 5963 to 11 125 m². The sea ice area of the Sea of Azov has decreased. The average sea ice area for 2015–2024 is 9.2 %. This is less than the long-term average for 1950–2024 and the climatic norm for 1991–2020. For this reason, ice hummocky formations are located mainly in the Taganrog Bay at depths of 0.5–2.5 m and are observed for an average of about 30 days. However, hummocky formations can form in the open sea and in the Kerch Strait in some winters when there is a large sea ice area (for example, winter 1953/54, 1955/56, etc.).

Keywords: ice hummocky formations, hummock, grounded hummock, sea ice, ice cover, Sea of Azov, Taganrog Bay, satellite monitoring

Accepted: 13.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-256-266

References

1. *Atlas l'dov Chernogo i Azovskogo morei* (Atlas of the Black and Azov Seas Ice), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1962, 120 p.
2. Berdnikov C. V., Dashkevich L. V., Kulygin V. V., New state of the hydrological regime of the Sea of Azov in the 21st century, *Doklady Earth Sciences*, 2022, V. 503, No. 1, pp. 123–128, DOI: 10.1134/S1028334X22030059.
3. Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Trofimenko L. T., Shvets N. V., *Opisanie massiva dannykh srednemesyachnoi temperatury vozdukh na stantsiyakh Rossii* (Description of the data array of average monthly air temperature at stations in Russia), Certificate of state registration of the database No. 2014621485 (RU), Reg. 10.04.2014 (in Russian).
4. Bukharitsin P. I., Ice ridging characteristics in the northern part of the Caspian Sea, *Vodnye resursy*, 1984, No. 6, pp. 115–123 (in Russian).
5. *Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoi zony morei SSSR. T. 3. Azovskoe more* (Hydrometeorological conditions of the shelf zone of seas in the USSR. V. 3. The Sea of Azov), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, 218 p. (in Russian).
6. *Gidrometeorologicheskii spravochnik Azovskogo morya* (Hydrometeorological directory of the Sea of Azov), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1962, 853 p. (in Russian).
7. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR. T. 5. Azovskoe more* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR seas. V. 5. The Sea of Azov), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991, 237 p. (in Russian).
8. Gorbunov Yu. A., Losev S. M., Dymant L. N., Stamukhas of the East Siberian and Chukchi Seas, *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*, 2007, Iss. 102, pp. 41–47 (in Russian).
9. Gorbunov Yu. A., Losev S. M., Dymant L. N., Stamukhas of the Laptev Sea, *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2008, No. 2(79), pp. 111–116 (in Russian).
10. Dashkevich L. V., Kulygin V. V., Berdnikov S. V., Many-year variations of the average salinity of the Sea of Azov, *Water Resources*, 2017, V. 44, No. 5, pp. 749–757, DOI: 10.1134/S0097807817040042.
11. Dumanskaya I. O., *Ledovye usloviya morei evropeiskoi chasti Rossii* (Ice conditions of the seas of the European part of Russia), Moscow; Obninsk: IG-SOTSIN, 2014, 608 p. (in Russian).
12. D'yakov N. N., Timoshenko T. Yu., Belogudov A. A., Gorbach S. B., *Atlas l'dov Chernogo i Azovskogo morei* (Atlas of the Black and Azov Seas Ice), Sevastopol: Sevastopol Branch of N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, 2015, 219 p. (in Russian).
13. D'yakov N. N., Fomin V. V., Cvecinsky A. S., Lipchenko A. E., Lukin D. V., Polozok A. A., Fomina I. N., Timoshenko T. Y., Belogudov A. A., Levickaya O. V., *Sovremennye gidrometeorologicheskie usloviya formirovaniya vetro-volnovykh, ledovykh i drugikh opasnykh yavlenii v Kerchenskom prolive* (Modern hydrometeorological conditions for the formation of wind-wave, ice and other dangerous phenomena in the Kerch Strait), Sevastopol: Roshydromet, Sevastopol Branch of N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, 2019, 365 p. (in Russian).
14. Kostianoy A. G., Kostianaia E. A., Lavrova O. Yu., Stochkov A. Ya., Satellite monitoring of ice cover in the Sea of Azov in winter 2022/2023, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 6, pp. 276–288 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-276-288.
15. 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, V. 14, No. 2, pp. 148–166 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-148-166.
16. 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 kosmosa*, 2017, V. 14, No. 1, pp. 247–251 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-247-251.
17. Magaeva A. A., *Ledovyi rezhim Azovskogo i Kaspiiskogo morei: mnogoletnyaya dinamika i opasnye yavleniya: diss. ... kand. geogr. nauk* (Ice regime of the Azov and Caspian Seas: long-term dynamics and hazardous phenomena, Cand. geogr. sci. thesis), Rostov-on-Don, 2022, 162 p. (in Russian).
18. Magaeva A. A., Tretyakova I. A., Creation of a digital elevation model of the Sea of Azov bottom, In: *Ehkologiya. Ehkonomika. Informatika. Sbornik statei. V 3 t. T. 3. Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring* (Ecology. Economics. Computer science. Collection of articles. In 3 V. V. 3. Geoinformation technologies and space monitoring), Rostov-on-Don: Southern Federal University Publishers, 2015, pp. 266–269 (in Russian).

19. Magaeva A. A., Yaitskaya N. A., Likhtanskaya N. V., Dashkevich L. V., Development of geoinformation system of the Russian southern seas ice conditions, In: *Ehkologiya. Ehkonomika. Informatika. Sbornik statei. V 3 t. T. 3. Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring* (Ecology. Economics. Computer science. Collection of articles. In 3 V. V. 3. Geoinformation technologies and space monitoring), Rostov-on-Don: Southern Federal University Publishers, 2015, pp. 269–275 (in Russian).
20. Matishov G. G., New data on bottom geomorphology of the sea of Azov, *Doklady Earth Sciences*, 2006, V. 409, No. 6, pp. 853–858, DOI: 10.1134/S1028334X06060031.
21. Matishov G. G., Dashkevich L. V., Kirillova E. E., Cyclicity of climate in the Sea of Azov region: The Holocene and the current period (19th to 21st centuries), *Doklady Earth Sciences*, 2021, V. 498, No. 1, pp. 436–440, DOI: 10.1134/S1028334X21050093.
22. Nesterov E. S., Maksimov A. A., Fedorenko A. V., Analysis of ice conditions on the Caspian Sea shipping routes, *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2023, No. 4(390), pp. 105–117 (in Russian), DOI: 10.37162/2618-9631-2023-4-105-117.
23. *Obnaruzhenie po sputnikovym dannym opasnykh ledyanykh obrazovaniy vblizi inzhenernykh ob"ektov khozyaistvennoi deyatelnosti na shel'fe Arkticheskikh morei: metodicheskoe posobie* (Detection of dangerous ice features near the arctic shelf engineering constructions with the use of satellite imagery: A methodical manual), V. G. Smirnov (ed.), Saint Petersburg: AARI, 2017, 76 p. (in Russian).
24. Platonova E. V., Bychkova I. A., Long-term observations of stamukhas in the East Siberian Sea using satellite data, *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2018, No. 53, pp. 103–112 (in Russian).
25. Smirnov V. G., Bychkova I. A., Mikhail'tseva S. V., Platonova E. V., Satellite monitoring of icebergs in the Arctic Seas, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, V. 44, No. 4, pp. 262–267, DOI: 10.3103/S1068373919040058.
26. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A. et al., Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 1, Article 77, 19 p., <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
27. Ogorodov S. A., Magaeva A. A., Maznev S. V. et al., Ice features of the Northern Caspian under sea level fluctuations and ice coverage variations, *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, V. 13, No. 3, pp. 129–138, DOI: 10.24057/2071-9388-2020-77.
28. Sigitov A., Kadranov Y., Vernyayev S., Analysis of stamukhi distribution in the Caspian Sea, *Proc. 25th Intern. Conf. "Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions" (POAC 2019)*, 2019, 14 p.