

УДК: 551.467.3(262.54)

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-235-244

А. А. Магаева¹

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЛЕДЯНЫХ ТОРОСИСТЫХ ОБРАЗОВАНИЙ АЗОВСКОГО И КАСПИЙСКОГО МОРЕЙ В 2015–2025 ГГ.

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию ледяных торосистых образований (ЛТО) Азовского и Каспийского морей в 2015–2025 гг. на основе результатов спутникового мониторинга и ГИС. Исследуемый период характеризуется сокращением ледовитости Азовского и Каспийского морей, а также продолжающимся падением уровня Каспийского моря, что оказывает влияние на формирование и локализацию ЛТО. Геоинформационный анализ совместно с цифровыми моделями рельефа дна позволил оценить местоположение ЛТО. Установлено, что наибольшее количество ЛТО сосредоточено на глубинах 1–2 м, максимальная глубина распространения единичных ледяных объектов — 9 м. Построены карты вероятности формирования ЛТО Азовского и Каспийского морей для периода 2015–2025 гг. Карты представлены в электронном варианте «Атласа опасных гидрометеорологических явлений в Азовском и Каспийском морях в XX–XXI вв.», который содержит результаты исследований опасных гидрометеорологических явлений и их сочетаний, совместного воздействия на берега и гидротехнические сооружения. В Азовском море ЛТО расположены преимущественно в Таганрогском зал., что обусловлено малой площадью морского льда в последние годы. Однако в отдельные зимы с большей площадью льда ЛТО могут образовываться в открытом море и у входа в Керченский пролив (например, в зимы 1953/54, 1955/56 гг. и др.). На Северном Каспии зона активного торошения льда захватывает большую площадь. Ледяные торосистые образования с вероятностью 75–100 % образуются в районе взморья дельты р. Волги и на мелководье восточной части Северного Каспия от устья Урала до п-ва Бузачи и в районе о-ов Кулалы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ледяные торосистые образования, морской лёд, ледовитость, Азовское море, Каспийское море, ГИС

Anastasia A. Magaeva²

GEOINFORMATION ANALYSIS AND MAPPING OF ICE HUMMOCKY FORMATIONS OF THE AZOV AND CASPIAN SEAS IN 2015-2025

ABSTRACT

The article is dedicated to the investigation of ice hummocky formations of the Azov and Caspian Seas in 2015–2025 based on the results of satellite monitoring and GIS. During this period, the ice cover of the Azov and Caspian Seas is decreasing, and the sea level of the Caspian Sea continues to decline. As a result, these changes affect the formation and localization of ice

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, пр-т Чехова, д. 41, Ростов-на-Дону, Россия, 344006, e-mail: a.magaeva@mail.ru

² Southern Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, 41, Chekhova ave., Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: a.magaeva@mail.ru

hummocky formations. The location of the ice hummocky formations was estimated using geoinformation analysis and digital elevation models. The results showed that the largest number of ice hummocky formations are concentrated at depths of 1–2 m, the maximum depth of distribution of some single ice objects is 9 m. Maps of the probability of formation of ice hummocky formations have been created for the period 2015–2025. The maps are presented in the electronic version of the “Atlas of dangerous hydrometeorological phenomena in the Azov and Caspian Seas in the 20th–21st centuries”, which contains the results of studies of dangerous hydrometeorological phenomena and their combinations, the combined impact on the coast and hydraulic structures. In the Sea of Azov, ice hummocky formations are located mainly in the Taganrog Bay, which is due to the small area of sea ice in recent years. However, in some winters with a larger ice area, ice hummocky formations can form in the open sea and at the entrance to the Kerch Strait (for example, in the winters of 1953/54, 1955/56, etc.). In the Northern Caspian, the zone of active ice hummocking covers a larger area. Ice hummock formations with a probability of 75–100 % are formed in the coastal area of the Volga Delta and in the shallow waters of the eastern part of the Northern Caspian from the mouth of the Ural to the Buzachi Peninsula and in the area of the Kulaly Islands.

KEYWORDS: ice hummocky formations, sea ice, ice concentration, Sea of Azov, Caspian Sea, GIS

ВВЕДЕНИЕ

Азовское и Каспийского моря — это южные замерзающие акватории, выгодное географическое положение которых обусловило широкое развитие морской транспортной сети. В Азово-Черноморском бассейне расположено 8 портов, в Северном Каспии — 3. Основными особенностями портов российского сектора являются относительно небольшие глубины и сезонный ледяной покров. Для обеспечения безопасного мореплавания здесь ежегодно проводятся дноуглубительные работы, а в зимний период организована ледовая проводка судов. Но иногда, ледовые условия бывают настолько сложными для судоходства, что ледоколы не справляются со своей задачей. Например, в январе 2008 г. около 150 судов ожидало ледокольной проводки у кромки льда в Керченском проливе. В экстремально суровую зиму 1953/1954 гг. вся акватория Северного Каспия была занята припаем толщиной 60–65 см, ледокольная проводка была приостановлена ввиду ее неэффективности, несколько нефтяных вышек были разрушены. Усложняет судоходство и работу ледоколов активное торошение льда. Данные процессы широко развиты на Азовском и северной части Каспийского морей ввиду их физико-географических особенностей: мелководность, извилистость береговой черты и довольно сложный рельеф дна с большим количеством банок, кос и островов в совокупности с ветровой активностью и колебаниями уровня создают благоприятные условия для торошения льдов и образования торосов и стамух. Подвижки этих ледяных торосистых образований приводят к механическому выпахиванию дна, образованию специфических ледово-экзарационных форм [Кошечкин, 1958; Barnes et al., 1984]. Данные процессы представляют опасность для гидротехнических и других инженерных сооружений. Так, в зимний сезон 2012–2013 гг. подвижки и наслоение льдин, толщина которых достигала нескольких десятков сантиметров, привели к аварии на нефтепромысле «Кашаган» в Казахском секторе Северного Каспия, где льдом были повреждены четыре нитки трубопровода, проложенного по дну без заглупления [Огородов и др., 2019].

Локализация ледяных торосистых образований зависит от степени суровости зимы и развития ледяного покрова на акватории, а также текущего положения уровня моря [Бухарицин и др., 2015]. Ранее в работе [Бухарицин, 1984] было показано, что падение уровня Каспийского моря в 1973–1980 гг. привело к смещению зоны максимальной

торосистости на юг от берега, в сторону больших глубин. Анализ зон ледовой экзарации на Аральском море [Maznev et al., 2019] также показал, что при падении уровня ледяные образования и зоны максимальных воздействий смещаются вслед за уровнем, удаляясь от изначальной береговой черты. Исследование [Ogorodov et al., 2020], в котором была применена цифровая модель рельефа (ЦМР) дна Северного Каспия, созданная в Научно-исследовательской лаборатории геоэкологии Севера Географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МГУ), показало, что подъем уровня в 2013–2019 гг. на ≈ 1 м по сравнению с периодом 1973–1980 гг. привел к значительному уменьшению расстояния до берега и глубины посадки стамух на мель.

Исследований, посвященных процессам торошения льдов и локализации ледяных торосистых образований Азовского моря чрезвычайно мало, в особенности для современных ледовых условий. В публикации [Атлас..., 1962] представлены карты распределения торосистого льда в Азовском море для различных типов зим для фактически наблюдавшихся условий, т. к. многолетние наблюдения на тот момент отсутствовали. В работе [Гидрометеорология..., 1991] представлена схема зон торосистости льда Азовского моря по данным прибрежных пунктов и судовых наблюдений. В ходе ранее выполненного исследования [Магаева, 2025] на основе данных дистанционного зондирования земли получены данные о локализации ЛТО Азовского моря для 2015–2024 гг. Данный период характеризуется сокращением ледовитости Азовского и Каспийского морей, изменением ветро-волновой активности [Яицкая, Магаева, 2025], а также продолжающимся с 2005 г. падением уровня Каспийского моря. Актуальная информация о локализации ЛТО в условиях изменения климата позволит повысить безопасность морского природопользования в акваториях Азовского и Каспийского морей.

Цель настоящей работы — выполнить геоинформационный анализ и картографирование ЛТО Азовского и Каспийского морей для современного гидроклиматического периода 2015–2025 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Информационной основой исследования является геоинформационная система (ГИС) «Ледовый режим южных морей России». ГИС разработана как уникальная среда для сбора, хранения, накопления, быстрого доступа к данным, их совместного использования и различных манипуляций [Магаева, Яицкая, 2021]. ГИС включает информацию о ледовых характеристиках в Азовском, Черном и Каспийском морях за период 1916–2025 гг. Также ГИС содержит данные о ЛТО, полученные из исторических картосхем авиаразведки и литературных источников [Атлас..., 1961; Атлас..., 1962; Гидрометеорология..., 1992], и данные из информационной системы ICEMAN¹ — положение стамух в Каспийском море за период 2013–2020 гг.

Данные о локализации ЛТО Азовского моря получены в ходе спутникового мониторинга для 2015–2025 гг., для Каспийского моря — для 2021–2025 гг. Алгоритм обнаружения ЛТО подробно описан в [Обнаружение..., 2017]. В ходе работы были использованы радиолокационные спутниковые снимки Sentinel-1 и оптические снимки Sentinel-2, а также Landsat-8. Работа со снимками проводилась с помощью сервиса «BS ИКИ-Мониторинг» разработанного Институтом космических исследований РАН [Loupian et al., 2022]. Сервис предоставляет распределенный доступ к многолетним ежедневно пополняющимся архивам спутниковых данных и получаемым на их основе различным информационным продуктам.²

¹ ICEMAN. Электронный ресурс: <https://www.ice-service.net/> (дата обращения 17.08.2024)

² ВЕГА-Science (УНУ «BS ИКИ-Мониторинг»). Электронный ресурс: <http://sci-vega.ru/> (дата обращения 17.08.2024)

Все исходные данные были объединены в ГИС, что позволило выполнить геоинформационный анализ местоположения и картографирование вероятности встречи ледяных торосистых образований Азовского и Каспийского морей для современных гидроклиматических условий 2015–2025 гг. Для создания карт вероятности была использована сетка с размером ячейки 10×10 км, которая ранее применялась для построения карт вероятности встречи льда и припая [Магаева, Яицкая, 2021]. Всего — 442 ячейки для Азовского моря и 1 371 ячейка для северной части Каспийского моря. Для каждой ячейки был выполнен расчет вероятности наличия ЛТО P_k (1):

$$P_k = \frac{N_k}{n_k} * 100 \% \quad (1),$$

где N_k — число встреч ЛТО,
 n_k — количество наблюдений в k -й ячейке.

Для оценки местоположения ЛТО использованы цифровые модели рельефа дна, созданные на основе карт батиметрии различного масштаба [Яицкая, 2016; Matishov, 2006].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Период 2015–2025 гг. характеризуется чередованием умеренных и мягких зим, суровых зимних периодов не наблюдалось. Значения сумм градусодней мороза (СГДМ) Азовского моря по данным пункта наблюдений Таганрог варьируется от $-524,4$ °С до $-57,2$ °С, северной части Каспийского моря по данным пункта наблюдений Астрахань — от $-423,1$ °С до $-110,3$ °С.

Среднее значение ледовитости Азовского моря за 2015–2025 гг. составляет 10,4 %, северной части Каспийского — 46,5 %, что меньше как среднееголетнее значения 1950–2025 гг., так и климатической нормы 1991–2020 гг. (табл. 1). Таким образом, тенденция сокращения площади льда с начала 1990-х гг. [Яицкая, Магаева, 2025] продолжается по настоящее время.

Табл. 1. Значения сумм градусодней мороза (СГДМ) и ледовитости Азовского и Каспийского морей

Table 1. Cumulative freezing degree-days and sea ice cover of the Azov and Caspian Seas

Акватория	Параметр	1950–2025	1991–2020	2015–2025
Азовское море	СГДМ Таганрог, °С	544	459	253
	Ледовитость, %	28,4	27,1	10,4
Каспийское море (северная часть)	СГДМ Астрахань, °С	446	367	261
	Ледовитость, %	55	49,2	46,5

По данным [Беспалова и др., 2020], среднееголетнее за 2003–2016 гг. значение уровня Азовского моря составляет 486 см. Уровень моря растет в среднем на 0,17 см/год, что сопоставимо с ростом уровня Мирового океана за последнее столетие [Venevsky et al., 2024]. По другим оценкам [Гинзбург и др., 2021], основанным на данных спутниковой альтиметрии, за период 1993 по 2020 гг. скорость подъема уровня Азовского моря составила $+0,21 \pm 0,05$ см/год, в результате чего уровень моря поднялся примерно на 6 см.

Уровень Каспийского моря с начала проведения инструментальных наблюдений и до XX в. колебался в среднем около отметки минус 25,8 м [Матишов и др., 2018]. Затем наблюдалась тенденция понижения, продлившаяся до 1977 г., когда уровень моря

находился на самой низкой отметке — $-29,0$ м. С 1980-х до 2005 г. уровень моря повышался и, достигнув отметки $-26,7$ м, начал падение, которое продолжается до настоящего времени. По информации¹, в конце 2024 г. уровень Каспийского моря достиг рекордно низкого уровня — $-29,5$ м.

На рис. 1 представлены карты вероятности формирования ледяных торосистых образований Азовского и Каспийского морей для периода 2015–2025 гг. На современном этапе, характеризующемся сокращением ледовитости Азовского моря, ледяные торосистые образования расположены преимущественно в Таганрогском заливе. В вершине залива вероятность встречи ЛТО составляет 50–100 %, в прибрежных районах залива — от 10 до 50 %. В открытой части моря за исследуемый период зафиксированы единичные ЛТО, что обусловлено малой площадью морского льда в последние годы. Однако в отдельные зимы с большей площадью льда ЛТО могут образовываться в открытом море и у входа в Керченский пролив (например, в зимы 1953/54, 1955/56 гг. и др.). Зона наибольшей концентрации ЛТО Азовского моря сосредоточена на глубинах 1–2 м; максимальная глубина, на которой зафиксированы ЛТО — 9 м.

На Каспийском море, ввиду большего распространения припая и его динамики в течение зимнего сезона, зона активного торошения льда захватывает большую площадь, нежели на Азовском море. Ледяные торосистые образования с вероятностью 75–100 % образуются в районе взморья дельты р. Волги и на мелководье восточной части Северного Каспия от устья Урала до п-ова Бузачи и в районе о-вов Кулалы. Наименьшая вероятность образования ЛТО в пределах впадины Уральская бороздина, глубина которой — 5–8 м, и в районе о-ва Тюлений. Наибольшая глубина распространения ЛТО — 9,6 м, единичный объект зафиксирован в зимний сезон 2016/2017 гг. в районе мыса Тюб-Караган.

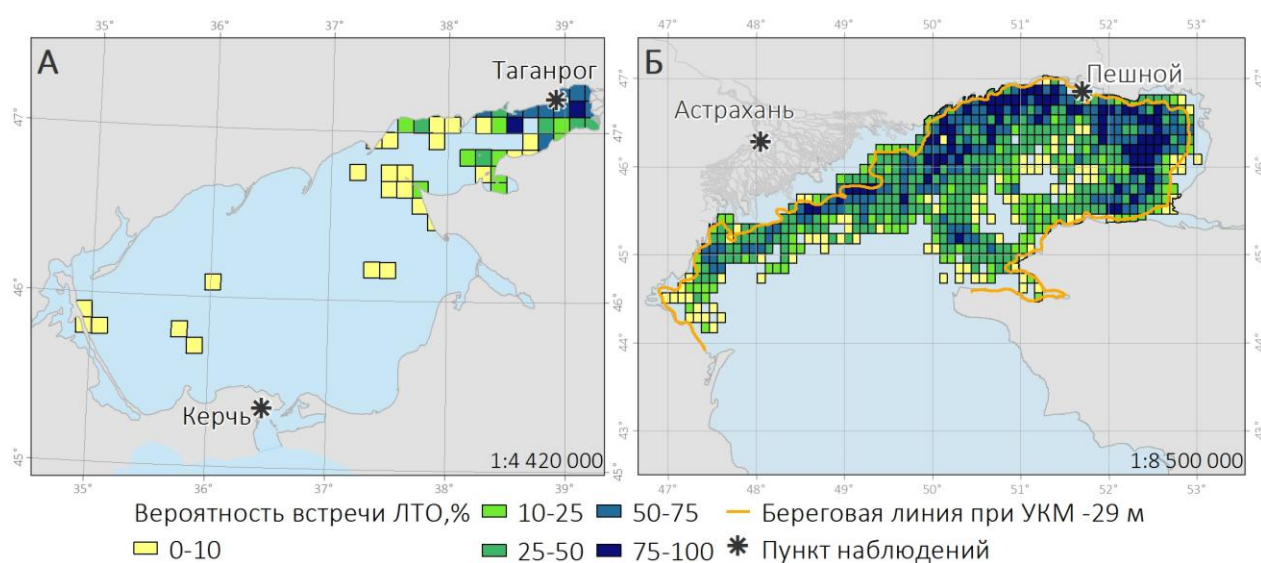


Рис. 1. Вероятность формирования ледяных торосистых образований за 2015–2025 гг. А — Азовское море, Б — Каспийское море

Fig. 1. Probability of formation of ice hummocky formations 2015–2025.

A — Sea of Azov, B — Caspian Sea

¹ ИзвестияИЗ. «Каспий достиг рекордно низкого уровня за последние 400 лет». Электронный ресурс: <https://iz.ru/1838800/andrei-korsunov/kaspii-dostig-rekordno-nizkogo-urovna-za-poslednie-400-let> (дата обращения 1.04.2025)

Локализация ледяных торосистых образований варьируется год от года в зависимости от гидрометеорологических условий зимнего сезона. Прямой взаимосвязи между локализацией ЛТО и гидрологическими параметрами не обнаружено: коэффициент корреляции ледовитости и средней глубины местоположения ЛТО составляет 0,6, между уровнем моря и средней глубиной местоположения ЛТО — $-0,4$ (для Каспийского моря). Однако несмотря на это, графики распределения ЛТО по глубине (рис. 2) показывают, что в 2025 г. продолжающееся падение уровня Каспийского моря привело к смещению зоны максимальной концентрации ЛТО.

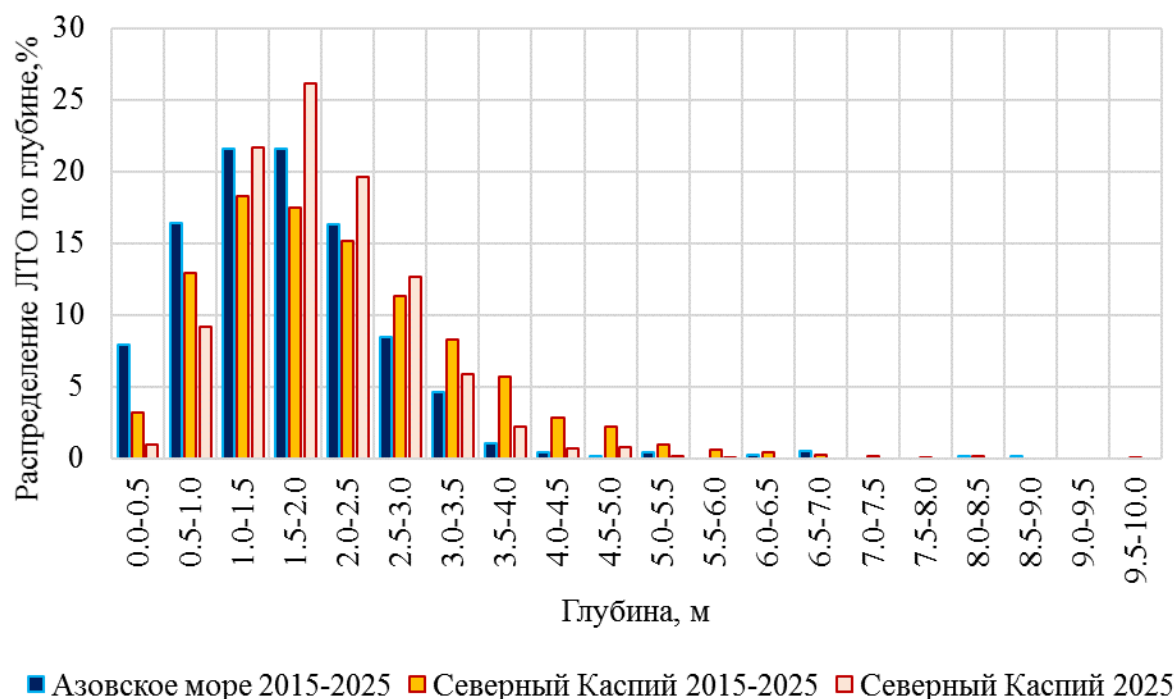


Рис. 2. Распределение ЛТО Азовского и Каспийского морей по глубине
Fig. 2. Distribution of ice hummocky formations of the Azov and Caspian Seas by depth

Полученные результаты еще раз подтверждают, что мониторинг и оценка динамики морского льда в условиях изменения климата и, как следствие, перестройки гидрометеорологического режима морей является чрезвычайно важной и актуальной задачей не только для получения новых фундаментальных знаний о природных процессах, но и для отраслей экономики и хозяйства. Разработанные карты вероятности встречи ледяных торосистых образований Азовского и Каспийского морей, а также карты вероятности встречи льда и припая, карты районирования акваторий по степени проявления опасных ледовых явлений представлены в электронном варианте «Атласа опасных гидрометеорологических явлений в Азовском и Каспийском морях в XX–XXI вв.».¹ Атлас содержит результаты исследований опасных гидрометеорологических явлений и их сочетаний, совместного воздействия на берега и гидротехнические сооружения. Разработанный комплекс карт имеет особую практическую значимость, т. к. может быть использован для морского пространственного планирования, обеспечения безопасности природопользования и эксплуатации морских и прибрежных гидротехнических сооружений.

¹ Атлас опасных гидрометеорологических явлений в Азовском и Каспийском морях в XX–XXI вв. Электронный ресурс: <http://caspien-atlas.com/> (дата обращения 1.04.2025)

ВЫВОДЫ

На основе данных дистанционного зондирования земли выполнен геоинформационный анализ и картографирование зон скопления ЛТО Азовского и Каспийского морей для периода 2015–2025 гг.

Установлено, что наибольшее число ледяных торосистых образований формируется на глубинах 1–2 м. В Азовском море на фоне сокращения ледовитости ледяные торосистые образования образуются преимущественно в Таганрогском заливе. В Каспийском море, ввиду большего распространения припая и его динамики в течение зимнего сезона, зона активного торошения льда захватывает большую площадь, нежели на Азовском море. Наибольшее число ЛТО образуется в районе взморья дельты р. Волги и на мелководье восточной части Северного Каспия от устья Урала до п-ова Бузачи и в районе о-ов Кулалы. Однако продолжающееся в 2025 г. падение уровня Каспийского моря привело к смещению зоны максимальной концентрации ледяных образований.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, No. 24-77-00088, <https://rscf.ru/en/project/24-77-00088/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас льдов Каспийского моря: Практическое пособие для работников морского флота и рыбной промышленности Л.: Гидрометеиздат, 1961. 76 с.

Атлас льдов Черного и Азовского морей. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 120 с.

Беспалова Л. А., Цыганкова А. Е., Беспалова Е. В., Мисиров С. А. Штормовые нагоны в Азовском море и их влияние на абразионные процессы. Труды Южного научного центра Российской академии наук, 2020. Т. 8. С. 111–121. DOI: 10.23885/1993-6621-2020-8-111-121.

Бухарицин П. И. Особенности процессов торошения ледяного покрова северной части Каспийского моря. Водные ресурсы, 1984. № 6. С. 115–123.

Бухарицин П. И., Огородов С. А., Архипов В. В. Воздействие ледяных образований на дно Северного Каспия в условиях колебаний уровня и ледовитости. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2015. № 2. С. 101–108.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 237 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 360 с.

Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей (1980–2020). Океанология, 2021. Т. 61. № 6. С. 900–912. DOI: 10.31857/S003015742106006X.

Кошечкин Б. И. Следы деятельности подвижных льдов на поверхности дна мелководных участков Северного Каспия. Труды Лаборатории аэрометодов АН СССР, 1958. Т. 6. С. 227–234.

Магаева А. А. Спутниковый мониторинг ледяных торосистых образований Азовского моря в 2015–2024 гг. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2025. Т. 22. № 2. С. 256–266. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-256-266.

Магаева А. А., Яицкая Н. А. Динамика припая Азовского моря в XXI веке. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Международной конференции, 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 74–84. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-74-84.

Матишов Д. Г., Яицкая Н. А., Бердников С. В. Изменение температуры и солености вод Каспийского моря в XX веке. Океанология, 2018. Т. 58. № 6. С. 864–874. DOI: 10.1134/S0030157418060114.

Обнаружение по спутниковым данным опасных ледяных образований вблизи инженерных объектов хозяйственной деятельности на шельфе Арктических морей: методическое пособие. СПб.: АНИИ, 2017. 75 с.

Огородов С. А., Мазнев С. В., Бухарицин П. И. Ледово-экскавационный рельеф на дне Каспийского и Аральского морей. Известия Русского географического общества, 2019. Т. 151. № 2. С. 35–50. DOI: 10.31857/S0869-6071151235-50.

Яицкая Н. А. Цифровая модель рельефа дна Каспийского моря. Экология. Экономика. Информатика, 2016. С. 187–196.

Яицкая Н. А., Магаева А. А. Климатический сдвиг гидрометеорологического режима Азовского и Каспийского морей. География и природные ресурсы, 2025. Т. 46. № 1. С. 105–113. DOI: 10.15372/GIPR20250110.

Barnes P. W., Rearic D. M., Reimnitz E. Ice Gouging Characteristics and Processes. The Alaskan Beaufort Sea: Ecosystems and Environments, 1984. P. 185–212.

Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System. Remote Sensing, 2022. V. 14. No. 1. P. 77. DOI: 10.3390/rs14010077.

Matishov G. G. New Data on Bottom Geomorphology of the Sea of Azov. Doklady Earth Sciences, 2006. V. 409. No. 6. P. 853–85. DOI: 10.1134/S1028334X06060031.

Maznev S. V., Ogorodov S. A., Baranskaya A. V., Selyuzhenok V. V. Aral Sea Ice Conditions in the Second Part of the 20th Century and their Effect on the Bottom Topography. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC, 2019. P. 1–10.

Ogorodov S. A., Magaeva A. A., Maznev S. V., Yaitskaya N. A., Vernyayev S., Sigitov A., Kadranov Y. 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.

Venevsky S. V., Berdnikov S. V., Day J. W., Sorokina V. V., Gong P., Kleshchenkov A. Y., Kulygin V. V., Li W., Misirov S. A., Sheverdyayev I. V. Don River Delta Hydrological and Geomorphological Transformation under Anthropogenic and Natural Forcings. Dynamics of Delta Shoreline, Risk of Coastal Flooding and Related Management Options. Ocean & Coastal Management, 2024. V. 258. P. 107364. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2024.107364.

REFERENCES

- Atlas of the Black and Azov Seas Ice. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1962. 120 p. (in Russian).
Atlas of Caspian Sea Ice: A Practical Guide for Workers of the Maritime Fleet and Fishing. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1961. 76 p. (in Russian).

Barnes P. W., Rearic D. M., Reimnitz E. Ice Gouging Characteristics and Processes. The Alaskan Beaufort Sea: Ecosystems and Environments, 1984. P. 185–212.

Bespalova L. A., Tsygankova A. E., Bespalova E. V., Misirov S. A. Storm Surges in the Sea of Azov and their Impact on Abrasion Processes. Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2020. V. 8. P. 111–121 (in Russian). DOI: 10.23885/1993-6621-2020-8-111-121.

Bukharitsin P. I. Features of Processes of Ice Hummocking in the Northern Part of the Caspian Sea. Water resources, 1984. No. 6. P. 115–123 (in Russian).

Bukharitsin P. I., Ogorodov S. A., Arkhipov A. A. Impact of Ice Bodies on the Seabed of the Northern Caspian Sea under Sea Level Fluctuation and Ice Coverage Changes. Moscow University Bulletin. Series 5. Geography, 2015. No. 2. P. 101–108 (in Russian).

Detection Using Satellite Data Hazardous Ice Formations Near Engineering Facilities of Economic Activity on the Shelf of the Arctic Seas: A Methodical Manual. Saint Petersburg: AARI, 2017. 76 p. (in Russian).

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. V. 61. No. 6. P. 745–756. DOI: 10.1134/S0001437021060060.

Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas. V. VI. Caspian Sea. Iss. 1. Hydrometeorological Conditions. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992. 360 p. (in Russian).

Hydrometeorology and Hydrochemistry of the USSR Seas. V. V. The Sea of Azov. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991. 237 p. (in Russian).

Koshechkin B. I. Traces of the Action of the Drifting Ice on the Sea Bottom in Shallow-Water Areas of the Northern Caspian. Proceedings of the Laboratory of Aeromethods of the USSR Academy of Sciences, 1958. V. 6. P. 227–234 (in Russian).

Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System. Remote Sensing, 2022. V. 14. No. 1. P. 77. DOI: 10.3390/rs14010077.

Magaeva A. A. Satellite Monitoring of Ice Hummocky Formations in the Sea of Azov in 2015–2024. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2025. V. 22. No. 2. P. 256–266 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-256-266.

Magaeva A. A., Yaitskaya N. A. Fast Ice Dynamics of the Sea of Azov in the XXI Century. InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Conference, 2021. V. 27. Part 3. P. 74–84 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-74-84.

Matishov G. G. New Data on Bottom Geomorphology of the Sea of Azov. Doklady Earth Sciences, 2006. V. 409. No. 6. P. 853–85. DOI: 10.1134/S1028334X06060031.

Matishov D. G., Yaitskaya N. A., Berdnikov S. V. Temperature and Salinity Variations in Caspian Sea Waters in the 20th Century. Oceanology, 2018. Vol. 58. No. 6. P. 786–795. DOI: 10.1134/S0001437018060103.

Maznev S. V., Ogorodov S. A., Baranskaya A. V., Selyuzhenok V. V. Aral Sea Ice Conditions in the Second Part of the 20th Century and their Effect on the Bottom Topography. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC, 2019. P. 1–10.

Ogorodov S. A., Magaeva A. A., Maznev S. V., Yaitskaya N. A., Vernyayev S., Sigitov A., Kadranov Y. 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.

Ogorodov S. A., Maznev S. V., Bukharitsin P. I. Ice Gouging Topography on the Caspian and Aral Seas Bottom. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshestva (Proceedings of the Russian Geographical Society)*, 2019. V. 151. No. 2. P. 35–50 (in Russian). DOI: 10.31857/S0869-6071151235-50.

Venevsky S. V., Berdnikov S. V., Day J. W., Sorokina V. V., Gong P., Kleshchenkov A. Y., Kulygin V. V., Li W., Misirov S. A., Sheverdyaev I. V. Don River Delta Hydrological and Geomorphological Transformation under Anthropogenic and Natural Forcings. Dynamics of Delta Shoreline, Risk of Coastal Flooding and Related Management Options. *Ocean & Coastal Management*, 2024. V. 258. P. 107364. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2024.107364.

Yaitskaya N. A. Digital Elevation Model of the Caspian Sea Bottom. *Ecology. Economy. Informatics*, 2016. P. 187–196 (in Russian).

Yaitskaya N. A., Magaeva A. A. Climatic Shift in the Hydrometeorological Regime of the Sea of Azov and the Caspian Sea. *Geography and Natural Resources*, 2025. V. 46. No. 1. P. 59–66. DOI: 10.1134/S1875372825700076.