

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-323-337>

УДК 551.467



**Влияние интенсивного судоходства
на изменение строения и динамики ледяного покрова
в юго-западной части Карского моря**

Т.А. Алексеева^{1,2}✉, С.С. Сероветников¹, Е.И. Макаров¹, В.А. Бородкин¹,
Д.М. Ермаков^{2,3}, В.В. Тихонов^{2,1,4}, А.В. Кузьмин², Е.В. Афанасьева^{1,2},
В.Д. Котельников¹, Д.Ю. Юскаев¹, Е.В. Козловский¹

¹ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

³ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

⁴ Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

✉taa@aari.ru

ТАА, 0000-0002-1575-8784; ДМЕ, 0000-0003-4414-5212; ВВТ, 0000-0003-3656-1734;
АВК, 0000-0001-6101-1094; ЕВА, 0000-0002-3005-4961; ВДК, 0009-0006-3204-5707;
ДЮЮ, 0009-0007-1810-3947

Аннотация. Развитие судоходства на Северном морском пути и переход к круглогодичной транзитной навигации требуют не только строительства новых мощных ледоколов и транспортных судов усиленного ледового класса, но и развития специализированного гидрометеорологического обеспечения ледового плавания. Для анализа спутниковой информации, разработки и валидации ледовых прогнозов необходимы фактические специализированные данные о ледяном покрове как среде судоходства. Такие данные можно получить только с борта судна, однако специальные научные экспедиции в зимний период организуются крайне редко. Для получения новых данных о ледяном покрове в районе интенсивного судоходства — в юго-западной части Карского моря — дважды в 2023 и 2024 гг. были организованы специальные судовые ледовые наблюдения на борту атомных ледоколов (экспедиции «ЛЕД-СМП»). В результате работ в рамках специализированного гидрометеорологического обеспечения навигации в юго-западной части Карского моря и одновременно осуществляемых в этом же районе научных экспедиций «ЛЕД-СМП» было выявлено существенное влияние техногенного фактора на изменения в строении и динамике ледяного покрова. В зимне-весенний период в юго-западной части Карского моря используются два основных маршрута плавания: через пролив Карские Ворота или к северу от мыса Желания. В 2024 г. сложилась уникальная навигационная обстановка — весь поток судов с начала апреля был направлен через мыс Желания из-за сложных условий ледового плавания к востоку от пролива Карские Ворота. При составлении специализированных долгосрочных ледовых прогнозов было обнаружено, что после перенаправления всего потока судов по одному маршруту изменился естественный ход процессов в ледяном покрове. Если в начале зимне-весеннего периода 2024 г. ситуация развивалась аналогично той, которая наблюдалась в подобранных годах-гомологах, то в конце сезона она изменилась и стала отличаться от естественных процессов, характерных для данной акватории. Во время специальных судовых ледовых наблюдений были

отмечены существенные изменения в строении морского льда на всем протяжении от Обской губы к мысу Желания, что должно сказываться и на скорости движения судов в таких льдах. В данной работе приведены первичные результаты анализа полученных в экспедиции «ЛЕД-СМП-1/2024» данных и описание подспутникового эксперимента, результаты которого в дальнейшем позволят определить степень влияния техногенного фактора на характеристики микроволнового излучения поверхности ледяного покрова.

Ключевые слова: ледовое плавание, ледовые прогнозы, микроволновая радиометрия, подспутниковый эксперимент, специальные судовые ледовые наблюдения, строение морского льда, техногенный фактор

Для цитирования: Алексеева Т.А., Сероветников С.С., Макаров Е.И., Бородин В.А., Ермаков Д.М., Тихонов В.В., Кузьмин А.В., Афанасьева Е.В., Котельников В.Д., Юскаев Д.Ю., Козловский Е.В. Влияние интенсивного судоходства на изменение строения и динамики ледяного покрова в юго-западной части Карского моря. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(3):323–337. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-323-337>

Поступила 15.08.2024

После переработки 05.09.2024

Принята 06.09.2024

The influence of heavy shipping traffic on the structure and dynamics of sea ice in the southwestern Kara Sea

Tatiana A. Alekseeva^{1,2✉}, Sergey S. Serovetnikov¹, Evgenii I. Makarov¹,
Vladimir A. Borodkin¹, Dmitry M. Ermakov^{2,3}, Vasilii V. Tikhonov^{2,1,4},
Alexey V. Kuzmin², Ekaterina V. Afanasyeva^{1,2}, Vladimir D. Kotelnikov¹,
Daniel Y. Yuskaev¹, Evgenii V. Kozlovsky¹

¹ State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

³ Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch, Fryazino, Moscow Region, Russia

⁴ Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

✉taa@aari.ru

 TAA, 0000-0002-1575-8784; DME, 0000-0003-4414-5212; VVT, 0000-0003-3656-1734; AVK, 0000-0001-6101-1094; EVA, 0000-0002-3005-4961; VDK, 0009-0006-3204-5707; DYY, 0009-0007-1810-3947

Abstract. The development of the Northern Sea Route and the beginning of year-round transit shipping require not only the production of new icebreakers and ice-class vessels, but also the development of a specialized hydrometeorological support system for ice shipping. For the analysis of satellite data and the development and validation of ice forecasts, actual field data on the ice cover is required. This data can only be obtained from shipboard observations; however, scientific expeditions are rarely organized during the winter. In order to obtain new data over the area of intensive shipping, two expeditions were organized on board of nuclear icebreakers in the southwestern Kara Sea (“LED-SMP” expeditions) in 2023 and 2024. Specialized hydrometeorological maintenance of ice shipping in the southwestern Kara Sea together with the research expeditions “LED-SMP” carried out in the same place and time on board the nuclear icebreakers revealed the influence of the technogenic factor on the sea ice structure and dynamics was revealed. In winter and spring, two main routes are used for navigation in the southwestern Kara Sea: through the Kara Gate Strait and north of Cape Zhelaniya. In April 2024, a unique situation occurred when, due to the difficult ice conditions east of the Kara Gate Strait, the entire ship traffic was directed north of Cape Zhelaniya. In preparing a long-term ice forecast, it was noted that after the redirection the natural development of ice processes changed. At the beginning of the winter period 2024,

the sea ice conditions developed in a way similar to those observed in the selected homologous years (years with similar scenarios of sea ice conditions development), however, at the end of the winter period they became different from what was typical of this water area. In performing shipboard observations, significant changes were noted in the sea ice structure along the entire route from Ob Bay to Cape Zhelaniya, which could also affect the speed of ships in such ice. The paper reports preliminary findings from analysis of the data obtained during the “LED-SMP-1/2024” expedition. Also, a description is given of a sub-satellite experiment the results of which should later enable us to determine the technogenic impact on the microwave radiation of the sea ice surface.

Keywords: ice forecast, man-made factor, microwave radiometry, sea ice navigation, sea ice structure, shipboard ice observations, sub-satellite experiment

For citation: Alekseeva T.A., Serovetnikov S.S., Makarov E.I., Borodkin V.A., Ermakov D.M., Tikhonov V.V., Kuzmin A.V., Afanasyeva E.V., Kotelnikov V.D., Yuskaev D.Y., Kozlovsky E.V. The influence of heavy shipping traffic on the structure and dynamics of sea ice in the southwestern Kara Sea. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(3):323–337. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-323-337>

Received 15.08.2024

Revised 05.09.2024

Accepted 06.09.2024

Введение

Одной из необходимых составляющих для достижения эффективности и безопасности ледового плавания по Северному морскому пути (СМП) является качественное специализированное гидрометеорологическое обеспечение (СГМО). В грузоперевозках по СМП, как альтернативы пути плавания через Суэцкий канал, заинтересованы многие страны [1–3]. Важнейшим направлением развития СГМО в настоящее время является усовершенствование существующих и разработка новых долгосрочных ледовых прогнозов, которые позволяют заблаговременно планировать морские операции. Несмотря на то, что в строй введены новые мощные атомные ледоколы и транспортные суда усиленного ледового класса, круглогодичная транзитная навигация по СМП до сих пор не осуществляется [4, 5]. На всем протяжении СМП существует несколько участков с неблагоприятными условиями ледового плавания в зимне-весенний период для любых типов судов. Долгосрочные ледовые прогнозы оптимальных вариантов плавания позволяют заранее предсказать периоды, когда в труднопроходимых районах ожидается появление разрывов и отсутствие сжатий. Наиболее востребованы такие прогнозы в тех районах и для тех периодов, для которых практически нет специализированных натурных данных об условиях ледового плавания, получаемых с борта судов и необходимых для валидации прогнозов.

В 2023 г. Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ) была начата серия экспедиций на борту атомных ледоколов в юго-западной части Карского моря [6]. Целью этих экспедиций являлась подготовка молодых специалистов для восполнения экспедиционного кадрового состава и передачи опыта специальных судовых ледовых наблюдений. Система таких наблюдений была разработана в ААНИИ еще в середине XX в. С 2004 г. ледовые наблюдения ААНИИ состоят из двух видов работ: непрерывные визуальные ледовые наблюдения за характеристиками морского льда по пути и по району движения судна [7] и измерения толщины льда и высоты снега с помощью судового телевизионного комплекса (СТК) [8, 9].

Одновременно с процессом подготовки специалистов в ходе первой экспедиции в 2023 г. было выявлено, что назрела необходимость комплексного пересмотра всей системы специальных судовых ледовых наблюдений. Такие наблюдения должны осуществляться в тесной взаимосвязи с задачами развития СГМО. В основе нового

подхода должен быть планируемый эксперимент, то есть форма и состав информации, получаемой на борту судна, должны соответствовать запросам СГМО (например, для оперативного уточнения ледовых прогнозов). Это в свою очередь выявило необходимость дальнейшей модернизации СТК: его использования для получения информации о строении льда при движении судна, что открывает возможности для развития нового научного направления — определения основного и локальных сценариев формирования льда. Подробные результаты разработок, проведенных в первой экспедиции «ЛЕД-СМП-1/2023», представлены в работе [6].

В ходе анализа полученных в экспедиции «ЛЕД-СМП-1/2023» данных возник ряд вопросов, которые привели к необходимости постановки новых исследовательских задач. В последующей экспедиции «ЛЕД-СМП-1/2024», которая состоялась в апреле–мае 2024 г., была расширена научная программа работ: использовалась модернизированная версия СТК для отработки новой технологии получения данных о строении льда при движении судна, а также был проведен новый подспутниковый эксперимент. Свою корректировку в программу исследований внесли и особенности весенней навигации 2024 г. в юго-западной части Карского моря. Из-за сложных условий плавания в районе пролива Карские Ворота весь поток судов из Баренцева моря в порты Карского моря и обратно проходил через мыс Желания. В районе основных навигационных трасс возникли уникальные условия формирования морского льда вследствие техногенного влияния большого потока грузовых судов и ледоколов. Это вызвало изменения в строении морского льда в юго-западной части Карского моря, динамике ледяного покрова и, как следствие, повлияло на точность ледовых прогнозов. Целью данной работы является представление первичных результатов анализа данных специальных судовых ледовых наблюдений в экспедиции «ЛЕД-СМП-1/2024» и описание подспутникового эксперимента как основы для дальнейших исследований изменений в ледовом и гидрологическом режиме юго-западной части Карского моря, связанных с интенсивным судоходством.

Экспедиция «ЛЕД-СМП-1/2024»

Специальные судовые ледовые наблюдения в 2024 г. выполнялись на борту атомного ледокола «Ямал». Маршрут экспедиции представлен на рис. 1. Экспедиция «ЛЕД-СМП-1/2024» проводилась во время семи рейсов ледокола от Обской губы к мысу Желания и обратно во время штатной работы ледокола по проводке судов на трассах СМП.

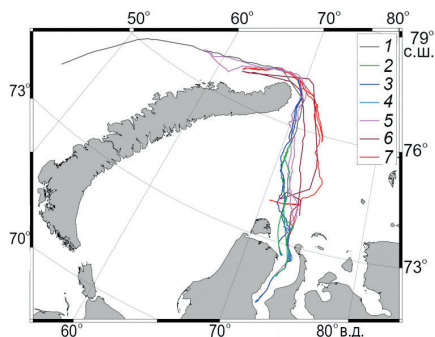


Рис. 1. Маршрут экспедиции «ЛЕД-СМП-1/2024» на борту атомного ледокола «Ямал» в юго-западной части Карского моря в период с 19 апреля по 20 мая 2024 г. Рейсы: № 1 — 19–21 апреля, № 2 — 22–26 апреля, № 3 — 26–29 апреля, № 4 — 29–30 апреля, № 5 — 01–06 мая, № 6 — 07–13 мая, № 7 — 16–20 мая 2024 г.

Fig. 1. The routes of expedition on board the nuclear icebreaker Yamal in the southwestern Kara Sea during the period of April 19 to May 20, 2024. Routes of Yamal. No. 1 — April 19–21, No. 2 — April 22–26, No. 3 — April 26–29, No. 4 — April 29–30, No. 5 — May 01–06, No. 6 — May 07–13, No. 7 — May 16–20, 2024

Особенности навигации 2024 г. в юго-западной части Карского моря

С апреля 2024 г. в юго-западной части Карского моря сложилась уникальная навигационная обстановка, которая не наблюдалась с начала круглогодичного безледокольного плавания в юго-западной части Карского моря в течение последних 20 лет. Информация о местоположении судов регулярно поступает в ААНИИ из диспетчерских сообщений с судов ледового класса, функционирующих на СМП, а также из различных источников АИС — автоматической идентификационной системы (<https://www.marinetraffic.com/> и <https://maritime.scanex.ru/>). 1 апреля 2024 г. через пролив Карские Ворота из Карского моря в Баренцево вышел танкер «Михаил Лазарев», двигаясь из Обской губы в порт Мурманск, и после этого рейса маршруты всех судов пролегли через мыс Желания, так как в районе пролива Карские Ворота в апреле сложились неблагоприятные условия для ледового плавания.

С точки зрения гидрологического и ледового режима в Карском море выделяются два резко различающихся района — юго-западная и северо-восточная части. В юго-западной части в зимний период наблюдаются преимущественно однолетние средние льды (диапазон толщины 70–120 см), а в летний период формируется Новоземельский ледяной массив. В северо-восточной части моря в зимний период наблюдаются преимущественно однолетние средние и толстые льды (толщина более 120 см), а в летний период формируются Североземельский и Карский Северный ледяные массивы [10]. Географическая граница районов проходит по линии, соединяющей мыс Желания и остров Диксон. Здесь же проходит и естественная граница районов, располагающаяся между северной оконечностью архипелага Новая Земля и мелководной частью Обь-Енисейского района, где часто формируются в меридиональном направлении разрывы и разводья [11]. Эта особенность ледово-гидрологического режима Карского моря всегда используется при реализации ледового плавания на трассах из Обской губы и Енисейского залива через мыс Желания. Однако в апреле и в мае 2024 г. переход ледового плавания был реализован исключительно по этой трассе. Таким образом, ледяной покров по этой трассе подвергался значительно большей техногенной нагрузке, чем в предыдущие годы, что вызвало необходимость исследования влияния данного явления на ледово-гидрологический режим всего Карского моря.

В ААНИИ разработан и утвержден Центральной методической комиссией по прогнозам Росгидромета в 2020 г. «Метод специализированного прогноза ледово-эксплуатационных характеристик безледокольного плавания современных типов судов по трассам СМП заблаговременностью до 1 месяца» (<https://method.meteorf.ru/cmkr/2020/dec20.pdf>). С помощью данного метода разрабатываются долгосрочные прогнозы условий ледового плавания на основе определения годов-гомологов [12]. Путем применения данного метода было выделено и проанализировано несколько годов-гомологов и антиподов по условиям ледового плавания для весны 2024 г. На рис. 2 представлены карты автоматического определения сплоченности льда по алгоритму ASI (радиометры AMSR-E и AMSR2, версия 5.4, разрешение 6,25 км, <https://data.seaice.uni-bremen.de/databrowser/>) для 22 апреля 2024 г., двух годов-гомологов 2006 и 2015, а также 2023 г. — антипода.

На рис. 2 видно, что в годах-гомологах (2006 и 2015) выявляется главное отличие ледово-гидрологического режима 2024 г. — отсутствие выраженных динамических структур в юго-западной части Карского моря. В 2023 г. такие структуры в юго-западной части Карского моря хорошо выражены. На рис. 3 представлены такие же данные для июня.

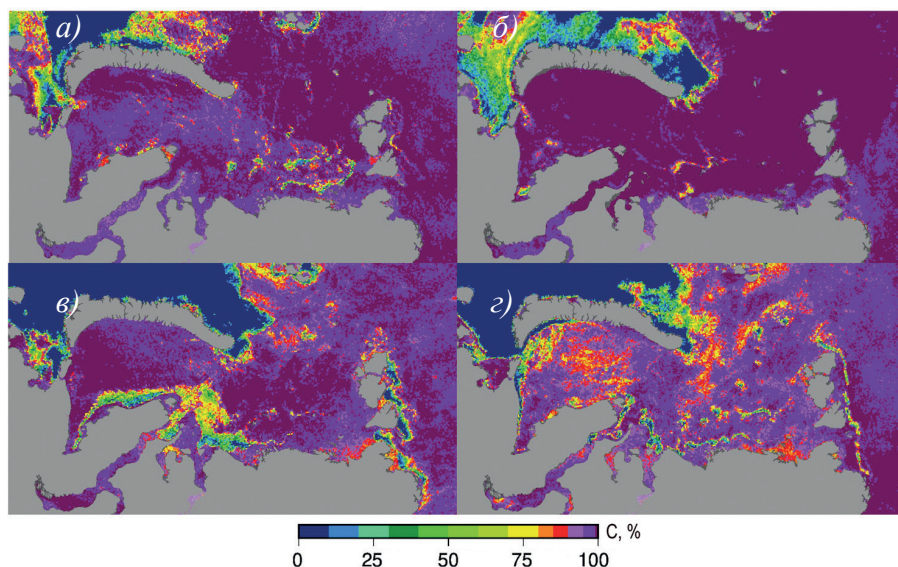


Рис. 2. Карты распределения сплоченности морского льда (<https://data.seaice.uni-bremen.de/databrowser/>) в Карском море 22 апреля 2024 г. (a); 2006 (б) и 2015 (в) (гомологи); 2023 г. (z) (антипод)

Fig. 2. Sea ice concentration maps (<https://data.seaice.uni-bremen.de/databrowser/>) on April 22 of 2024 (a), 2006 (б), 2015 (в) (homologous years), and 2023 (z) (antipodal year)

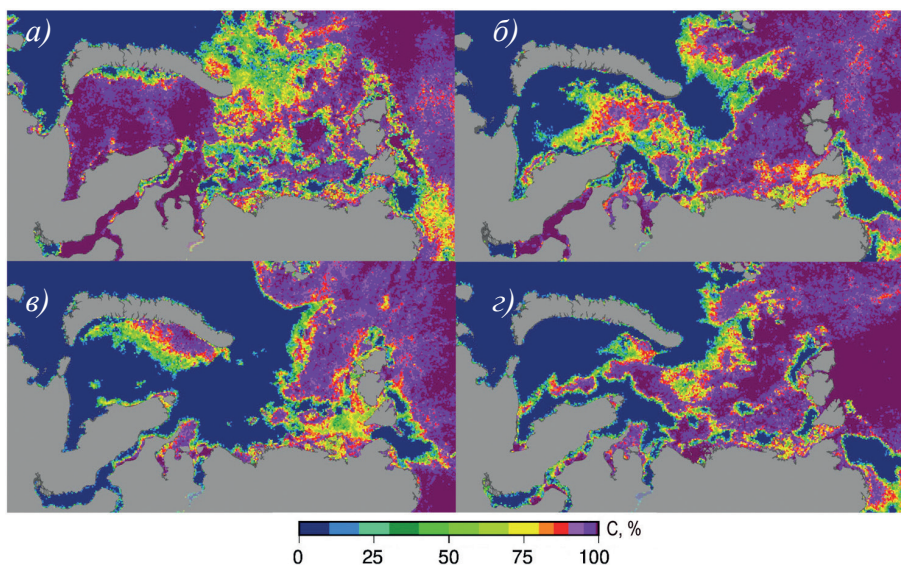


Рис. 3. Карты распределения сплоченности морского льда (<https://data.seaice.uni-bremen.de/databrowser/>) в Карском море 22 июня 2024 г. (a); 2006 (б) и 2015 (в) (гомологи); 2023 г. (z) (антипод)

Fig. 3. Sea ice concentration maps (<https://data.seaice.uni-bremen.de/databrowser/>) on June 22 of 2024 (a), 2006 (б), 2015 (в) (homologous years), and 2023 (z) (antipodal year)

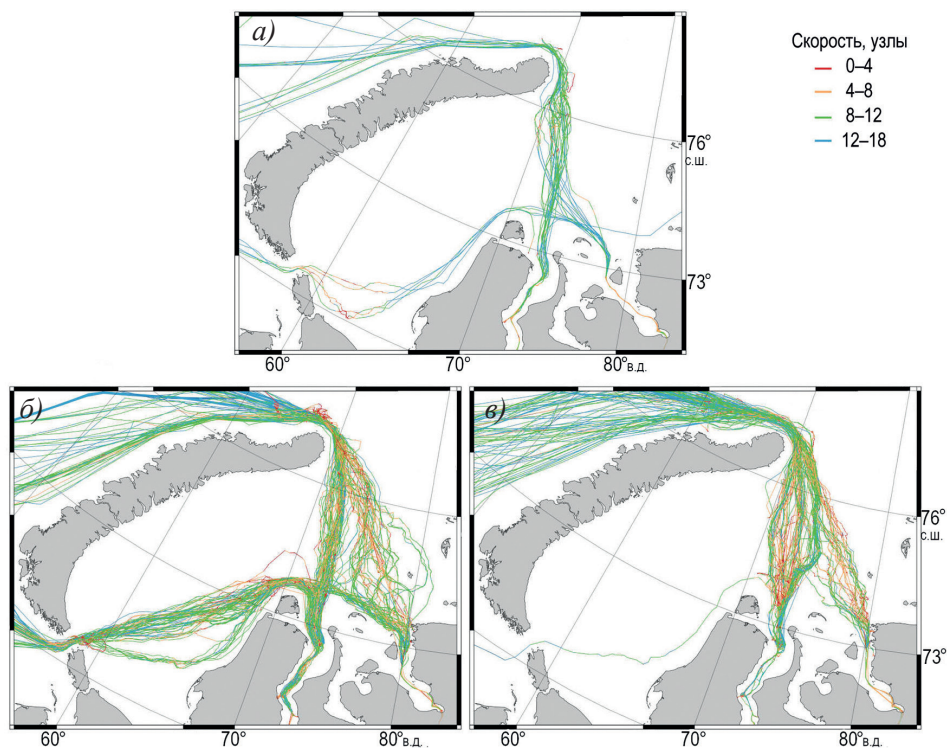


Рис. 4. Маршруты плавания ледоколов и судов ледового класса Arc7 в юго-западной части Карского моря с 19 апреля по 20 мая 2015 (а), 2023 (б) и 2024 (в) гг.

Fig. 4. The routes of icebreakers and Arc7 ice class vessels in the southwestern Kara Sea from April 19 to May 20 of 2015 (a), 2023 (b) and 2024 (c)

На рис. 3 отчетливо видно, что в июне ни в одном из годов-гомологов уже не прослеживается динамика ледяного покрова 2024 г. При этом наблюдается хорошее пространственное соответствие в распределении сплоченности льда. То есть динамика морского льда в юго-западной части Карского моря до апреля 2024 г. развивалась по сценарию годов-гомологов, а затем, в июне, после интенсивного судоходства по одному маршруту плавания сценарий изменился. Наблюдаемые изменения привели к возникновению гипотезы о наличии техногенного фактора, влияющего на ледово-гидрологический режим Карского моря.

Первое предположение о возможном влиянии техногенной нагрузки на ледяной покров Карского моря в связи со значительным увеличением судоходства в п. Сабетта в зимне-весенний период было сделано в 2018 г. при ледовом гидрометеорологическом обеспечении зимне-весенних морских операций и обсуждении особенностей плавания с судоводителями. Тогда было отмечено, что динамика ледяного покрова на трассах через мыс Желания не соответствует его естественным природным особенностям, а напоминает преобразованную техногенную среду. Фактически 2018 год не является природным годом-гомологом 2024 года, но при анализе условий ледового плавания в нем были выявлены гомологии в реакции ледово-гидрологического режима на техногенную нагрузку. Подобные проявления предполагались и в последующие

годы, но наиболее ярко проявились в 2023 и 2024 гг. с получением доказательной базы в виде специализированных натурных данных с борта атомного ледокола. Для иллюстрации интенсификации судоходства в юго-западной части Карского моря на рис. 4 представлены маршруты плавания судов в 2015, 2023 и 2024 гг. за месячный период, в течение которого длилась экспедиция «ЛЕД-СМП-1/2024» (19 апреля — 20 мая). 2015 год выбран как более ранний год-гомолог с менее интенсивным судоходством. В 2023 г. интенсивность судоходства значительно возросла, но маршруты плавания равномерно распределялись по двум навигационным трассам — через пролив Карские Ворота и через мыс Желания. В 2024 г. все маршруты проходили через мыс Желания, кроме одного рейса танкера «Михаил Лазарев», упомянутого в начале данного раздела.

Сложившиеся условия привели к формированию устойчивой труднопроходимой полосы льда между 73° с. ш. и 71° в. д. Движение судов через многократно колотый, раздробленный и смерзшийся лед в этой полосе происходило с существенным снижением скорости до значений менее 4 узлов, заклиниванием и работой ударами.

Отработка технологии получения данных о строении льда при движении судна с помощью СТК

В задачи экспедиции входило исследование некоторых особенностей строения льда по данным СТК в районах с повышенной частотой разрушения ледяного покрова в результате техногенного воздействия. При движении ледокола с помощью СТК выполнялась съемка выворотов льдин, позволяющая зафиксировать толщину льда, текстурный рисунок вертикальных срезов ледяного покрова, в том числе и слоистость (рис. 5).



Рис. 5. Фотография выворотов льда у борта во время движения а/л «Ямал» в юго-западной части Карского моря

Fig. 5. The photo of ice floes that turned up along the hull of the icebreaker “Yamal” as it moves in the southwestern Kara Sea

На фотографиях текстурных рисунков вертикальных срезов фиксировалась повышенная слоистость относительно естественного нарастания льда в природных условиях, что однозначно обусловлено техногенной нагрузкой в районе исследований. Регулярное разрушение ледяного покрова при движении судов по пути следования и последующее замерзание образовавшихся обломков стимулирует образование новых слоев на нижней границе льда, возникших в результате этих процессов. Существенную роль в формировании слоистости льда играет наличие стока пресных вод суши, которые вытесняют соленую морскую воду, образуя подо льдом слой распресненной воды. При движении судов вращением винтов осуществляется перемешивание слоев воды, имеющих различную соленость и температуру. В этих условиях может возникать переохлаждение воды, приводящее к образованию внутриводного льда и облипанию корпуса судов шуговым льдом. Смораживание шуги происходит не только на корпусе судна, но и на нижней поверхности льда, создавая дополнительный слой. Возможно, переохлаждение воды на мелководье способствует образованию донного льда, который, захватывая мелкие частицы грунта, поднимает их к нижней границе ледяного покрова, формируя прослойки с минеральными включениями.

В экспедиции «ЛЕД-СМП-1/2024» осуществлялось измерение солености заборной воды. Технические особенности системы забора морской воды на ледоколе позволяли получать только осредненные значения солености в слое 11 метров, что накладывало соответствующие ограничения на возможность выявления слоистости воды в районе работы.

Первичный анализ распределения осредненной солености воды (рис. 6) позволяет выделить основные зоны влияния солености на различия в формировании льда в исследуемом районе. Так, выше широты 74° с. ш. осредненная соленость воды повсеместно составляла более 20 ‰, а в Обской губе менялась от 2 ‰ до 19 ‰, увеличиваясь с юга на север. В зонах неустойчивых значений солености вероятность образования переохлаждения воды и, значит, вероятность возникновения шугового льда при движении судов значительно возрастает, что находит отражение в повышенной слоистости льда при его намерзании снизу. В районе Обской губы частота слоев в вертикальных срезах льда выше, чем в центральной и северной частях Карского моря (рис. 7). Чаше встречаются слои с минеральными включениями.

Первичный анализ полученных данных позволяет говорить о необходимости рассмотрения таких явлений, как сток пресных вод суши, частота прохождения судов

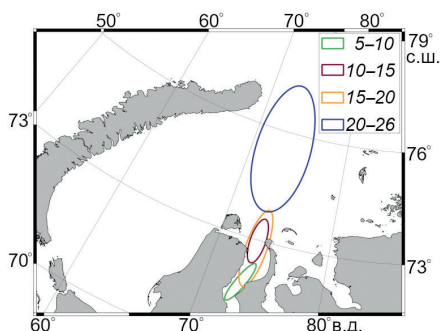


Рис. 6. Участки морской акватории с различными значениями солености морской воды (‰)

Fig. 6. Areas of different values of sea water salinity (‰)

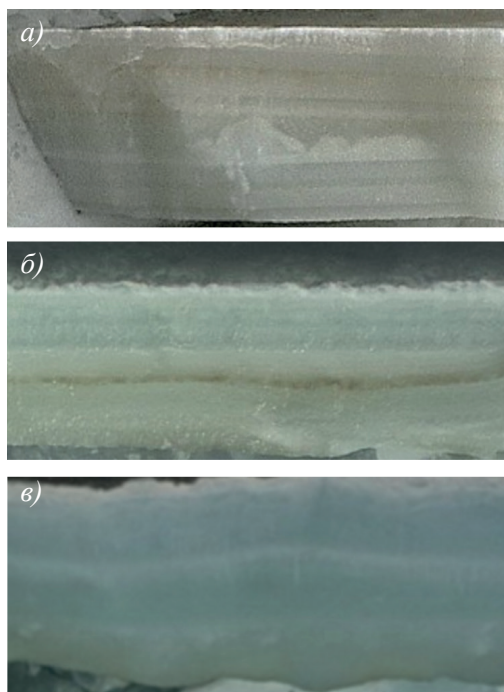


Рис. 7. Слоистость льда на различных широтах по основному маршруту следования а/л «Ямал» в точках с координатами 73,163° с. ш. 73,128° в. д. (а), 74,000° с. ш. 71,419° в. д. (б), 76,016° с. ш. 70,552° в. д. (в)

Fig. 7. The layered structure of sea ice observed at different latitudes along the route of the “Yamal” icebreaker. The photos were taken at the points of 73.163° N; 73.128° E (a), 74.000° N; 71.419° E (б), and 76.016° N; 70.552° E (в)

в данной акватории и частота техногенного разрушения сплошности ледяного покрова, перемешивание подледных вод в результате работы винтов судов, образование внутриводного льда и его фиксация на нижней поверхности льда, на корпусе судна и на дне (эффект облипания), образование слоистости льда, как единого механизма формирования льда в условиях постоянного техногенного воздействия в результате транспортных операций.

Таким образом, возникает необходимость в разработке методики изучения льда, сформированного в таких условиях, получении данных о температуре и солёности воды, строении льда и его физических свойствах.

Проведение подспутникового эксперимента

Регулярный мониторинг состояния ледяного покрова Арктики в глобальном масштабе осуществляется на основе измерений спутниковых микроволновых радиометров (SSMIS, AMSR-2 и др.). В настоящее время разработаны и применяются на практике более десятка алгоритмов восстановления сплоченности и площади морского ледяного покрова по данным спутниковой микроволновой радиометрии [13, 14]. Проблемным аспектом получаемых спутниковых данных и, соответственно, этих алгоритмов является низкое пространственное разрешение измерений. Изменчивость

ледяного покрова, особенно при интенсивных процессах его формирования или разрушения, в пределах пятна разрешения спутникового микроволнового радиометра может быть очень велика [15].

Для уточнения связей между характеристиками естественного морского ледяного покрова и спектром формируемого им восходящего микроволнового излучения требуется проведение комплексных натурных подспутниковых экспериментов. Основной целью таких экспериментов является получение данных микроволновых измерений, аналогичных спутниковым, но с высокой пространственной детализацией, совместно с информацией об актуальном состоянии ледяного покрова в точках наблюдений по данным синхронных оптических измерений и на основе экспертных оценок. Таким образом, главной задачей подспутникового эксперимента в экспедиции «ЛЕД-СМП-1/2024» было обеспечение микроволновых радиометрических измерений подстилающей поверхности (ледяного покрова и/или областей открытой воды) на наборе частот, близком к реализованному в спутниковых радиометрах и применяемом в алгоритмах восстановления сплоченности ледяного покрова. Для учета вклада атмосферного излучения, а также для реализации процедуры внешней калибровки радиометров важной задачей было периодическое наблюдение атмосферы под разными зенитными углами.

Успешное выполнение эксперимента и получение калиброванной, пространственно-привязанной, хронометрированной радиометрической информации, совмещенной с данными оптических наблюдений и экспертными оценками, обеспечивает возможность решения следующих задач:

1) уточнение диэлектрических свойств различных типов ледяного и снежного покрова в микроволновом диапазоне (эффективных коэффициентов излучения и отражения);

2) проверка и уточнение используемых в практике дистанционного зондирования алгоритмов восстановления характеристик подстилающей поверхности по микроволновым данным: сплоченности ледяного покрова, толщины снежного покрова, эффективной толщины и температуры слоя, формирующего восходящее микроволновое излучение.

В подспутниковом эксперименте 2024 г. был использован микроволновый радиометрический комплекс (рис. 8а), позволявший выполнять измерения на частотах 5,5 ГГц (попеременно на вертикальной и горизонтальной поляризациях), 19 ГГц, 22,2 ГГц (только вертикальная поляризация), 36 ГГц (одновременно на вертикальной и горизонтальной поляризации), 60 ГГц, 92 ГГц (только вертикальная поляризация). Радиометрические измерения сопровождалась видеозаписью ледовой обстановки в районе пятна наблюдений с частотой 1 кадр в 2 секунды и записью навигационной информации для точной координатной привязки. Измерительный комплекс позволял механически менять зенитные углы наблюдений. В эксперименте были реализованы два основных режима наблюдений: под углом 37° к поверхности (53° к нормали), что соответствует геометрии наблюдений спутниковых радиометров SSMIS и AMSR-2 [8], и под углом 25° к поверхности (65° к нормали), что соответствует геометрии наблюдений МТВЗА-ГЯ [16, 17]. В ходе периодических калибровочных процедур выставлялись зеркальные к ним (относительно горизонта) углы, составляющие 53° и 65° к направлению в зенит соответственно. Кроме того, осуществлялось медленное сканирование атмосферы по углу места от горизонта

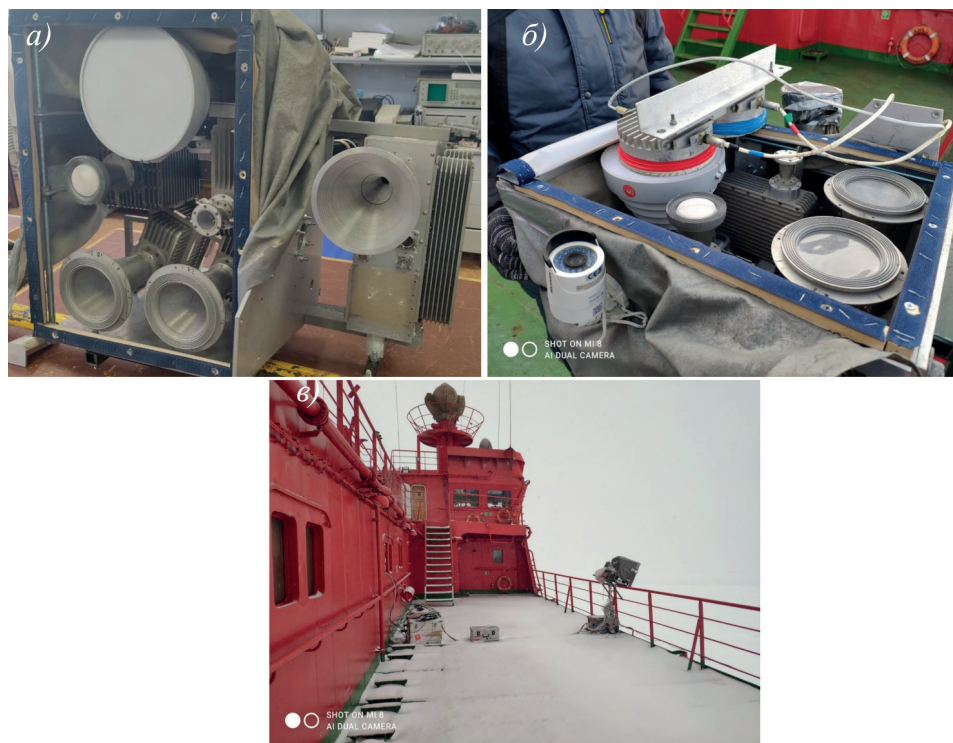


Рис. 8. Микроволновый радиометрический комплекс в сборе (а), во время калибровки с помощью эталонных излучателей («холодной» и «горячей» нагрузок) (б) и на борту ледокола «Ямал» во время измерений (в)

Fig. 8. A complete set of the microwave radiometric complex (a), the complex during calibration using standard emitters (“cold” and “hot” loads) (b), and the complex fixed on board the “Yamal” icebreaker during measurements (c)

до направления в зенит. В верхней точке выполнялась калибровка с помощью эталонных излучателей («холодной» и «горячей» нагрузок) при температурах около 14°C и 50°C соответственно (рис. 8б). Углы наблюдений непрерывно контролировались с помощью трехосевого инклинометра, запись его показаний велась синхронно с записью других измерений.

Аппаратура была размещена на борту ледокола «Ямал» на высоте около 17,5 м над поверхностью (рис. 8в), что, при использованных зенитных углах наблюдений (53° и 65° к надиру), давало удаление центра пятна измерений от борта на расстояния около 23,2 м и 35,5 м. Главные оси всех радиометрических приборов были совмещены. Размер области пятен, имеющих эллиптическую форму (вытянутую перпендикулярно курсу), увеличивался с ростом длины волны излучения. В наиболее низкочастотных каналах они имели следующие поперечные размеры для угла наклона 53° к надиру (при угловом размере диаграммы направленности антенны по уровню 3 дБ): для 5,5 ГГц — 10,4 м; для 19 ГГц и 22,2 ГГц — 9,0 м. При угле наклона 65° к надиру эти размеры составили, соответственно, для 5,5 ГГц — 14,8 м; для 19 ГГц и 22,2 ГГц — 12,8 м.

Подспутниковый эксперимент проводился как на участках относительно нетронутого льда, так и на участках сильно деформированного льда. Дальнейший анализ полученных данных позволит выявить степень влияния техногенного фактора на характеристики микроволнового излучения поверхности ледяного покрова.

Заключение

Результаты анализа данных специальных судовых ледовых наблюдений, полученных во время двух весенних экспедиций «ЛЕД-СМП-1/2023» и «ЛЕД-СМП-1/2024», позволили выявить существенные изменения в структуре ледяного покрова в районах интенсивного судоходства. Кроме этого, было отмечено существенное влияние техногенного фактора на прогнозирование динамики ледяного покрова и изменения в строении морского льда. Обнаруженное влияние техногенного фактора на формирование ледяного покрова вызвало множество научных и практических вопросов, которые необходимо срочно и тщательно исследовать:

1. Каким образом интенсивное судоходство меняет строение морского льда и, наоборот, как измененный ледяной покров влияет на фактическую ледопроеходимость судов?

2. Как изменяется динамика ледяного покрова в районах интенсивного судоходства и как это необходимо учитывать в ледовых прогнозах?

3. Каковы особенности отображения льдов с измененной в результате техногенного воздействия структурой на спутниковых снимках в различных диапазонах электромагнитного спектра?

Для полного ответа на эти вопросы требуются дополнительные эксперименты и новые экспедиции, захватывающие весь период формирования и таяния ледяного покрова в юго-западной части Карского моря, а также подробный анализ спутниковой информации и отслеживание изменений и дрейфа деформированного льда.

Конфликт интересов. Авторы не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Визуальные ледовые наблюдения, получение данных о толщине льда с помощью СТК ААНИИ в экспедиции «ЛЕД-СМП-1/2024», а также анализ влияния техногенного фактора на долгосрочные ледовые прогнозы, модернизация СТК, анализ структуры ледяного покрова были поддержаны Российским научным фондом, грант № 23-17-00161 (Т.А. Алексеева, С.С. Сероветников, Е.И. Макаров, В.В. Тихонов, Е.В. Афанасьева, В.Д. Котельников, Д.Ю. Юскаев, Е.В. Козловский).

Разработка микроволнового радиометрического комплекса в ИКИ РАН и проведение с его помощью подспутникового эксперимента на борту атомного ледокола в экспедиции «ЛЕД-СМП-1/2024» выполнялись в рамках темы «Мониторинг» гос. регистрация № 122042500031-8 (Д.М. Ермаков, А.В. Кузьмин).

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The visual ice observations, the collection of data on ice thickness using the AARI STK in the LED-SMP-1/2024 expedition and the analysis of the impact of technogenic factors on long-term ice forecasts, modernization of the STK, the analysis of the ice cover structure were supported by the Russian Science Foundation [grant number 23-17-00161] (T.A. Alekseeva, S.S. Serovetnikov, E.I. Makarov, V.V. Tikhonov, E.V. Afanasyeva, V.D. Kotelnikov, D.Yu. Yuskaev, E.V. Kozlovsky).

The development of a microwave radiometric complex at the Space Research Institute and the subsatellite experiment using the complex on board a nuclear icebreaker in the LED-SMP-1/2024 expedition were carried out within the framework of the topic "Monitoring" state registration No. 122042500031-8 (D.M. Ermakov, A.V. Kuzmin).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Nguyen L.H., Park S-H., Yeo Gi-Tae. Keyword network analysis: Uncovering research trends on the Northern Sea Route. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. 2021;37(3):231–238. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2021.06.001>
2. Gunnarsson B., Moe A. Ten years of international shipping on the Northern Sea Route: trends and challenges. *Arctic Review on Law and Politics*. 2021;12:4–30. <https://doi.org/10.23865/arctic.v12.2614>
3. Григорьев М.Н. Развитие транзитного потенциала Северного морского пути. *Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право*. 2019;12(5):109–129. <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2019-12-5-109-129>
Grigoryev M.N. Development of transit potential of the Northern Sea Route. *Outlines of global transformations: politics, economics, law*. 2021;14(4):81–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2019-12-5-109-129>
4. Chen S.-Y., Kern S., Li X.-Q., Hui F.-M., Ye Y.-F., Cheng X. Navigability of the Northern Sea Route for Arc7 ice-class vessels during winter and spring sea-ice conditions. *Advances in Climate Change Research*. 2022;13(5):676–687. <https://doi.org/10.1016/j.accres.2022.09.005>
5. Li X., Otsuka N., Brigham L.W. Spatial and temporal variations of recent shipping along the Northern Sea Route. *Polar Science*. 2021;27:100569. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100569>
6. Алексеева Т.А., Макаров Е.И., Бородин В.А., Сероветников С.С., Саперштейн Е.Б., Соколова Ю.В., Котельников В.Д. Развитие методики проведения специальных судовых ледовых наблюдений. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023;69(4):394–406. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-394-406>
Alekseeva T.A., Makarov Y.I., Borodkin V.A., Serovetnikov S.S., Saperstein E.B., Sokolova Yu.V., Kotelnikov V.D. Development of the method of special ship ice observations. *Arctic and Antarctic Research*. 2023;69(4):394–406. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-394-406>
7. Наблюдения за ледовой обстановкой. СПб.: ГУ «АНИИ»; 2009. 360 с.
8. Сероветников С.С., Фролов С.В., Клейн А.Э. Судовой телевизионный комплекс — реализация автоматизированной системы натурных измерений толщины морского льда. *Российская Арктика*. 2018;2:41–55. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00017>
Serovetnikov S.S., Frolov S.V., Klein A.E. Ship-based television complex — the program for automatic sea ice thickness monitoring. *Russian Arctic*. 2018;2:41–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00017>
9. Афанасьева Е.В., Сероветников С.С., Алексеева Т.А., Гришин Е.А., Солодовник А.А., Филиппов Н.А. Применение данных судового телевизионного комплекса в оперативном гидрометеорологическом обеспечении морской деятельности на примере картирования толщины ледяного покрова в Арктике. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022;68(2):96–117. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>
Afanasyeva E.V., Serovetnikov S.S., Alekseeva T.A., Grishin E.A., Solodovnik A.A., Filippov N.A. Mapping the thickness of sea ice in the Arctic as an example of using data from a ship-based television complex for operational hydrometeorological support of maritime activities. *Arctic and Antarctic Research*. 2022;68(2):96–117. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>
10. Карклин В.П., Юлин А.В., Шаратунова М.В., Мочнова Л.П. Климатическая изменчивость ледяных массивов Карского моря. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017;4:37–46. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-4-37-46>

- Karklin V.O., Yulin A.V., Sharatunova M.V., Mochnova L.P. Climate variability of the Kara sea ice massifs. *Arctic and Antarctic Research*. 2017;(4):37–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-4-37-46>
11. Бузуев А.Я., Дубовцев В.Ф., Захаров В.Ф., Смирнов В.Н. *Условия плавания судов во льдах морей северного полушария*. М.: ГУНиО; 1988. 280 с.
 12. Саперштейн Е.Б., Макаров Е.И., Алексеева Т.А., Павлова Е.А. Новый подход в исследовании динамики ледового покрова Арктики и его практическое приложение в интересах судоходства. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2024; Специальный выпуск 1:168–176. EDN: QALYWX
Sapershtein E.B., Makarov E.I., Alekseeva T.A., Pavlova E.A. New approach to Arctic ice dynamics research and its applications in Arctic shipping. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2024; Special Issue 1:168–176. (In Russ.). EDN: QALYWX
 13. Тихонов В.В., Раев М.Д., Шаркав Е.А., Боярский Д.А., Репина И.А., Комарова Н.Ю. Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов. Обзор. *Исследование Земли из космоса*. 2016;4:65–84. <https://doi.org/10.7868/S0205961416040072>
Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Repina I.A., Komarova N.Yu. Satellite microwave radiometry of sea ice of polar regions: a review. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016;52(9):1012–1030. <https://doi.org/10.1134/S0001433816090267>
 14. Ivanova N., Pedersen L., Tonboe R., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sorensen A., Saldo R., Dybkjaer G., Brucker L., Shokr M. Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations. *Cryosphere*. 2015;9:1797–1817. <https://doi.org/10.5194/tc-9-1797-2015>
 15. Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Афанасьева Е.В., Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Ковалев С.М., Смоляницкий В.М. Влияние загрязненности морского льда на ошибки в определении сплоченности в период таяния по данным спутниковой микроволновой радиометрии. *Исследование Земли из космоса*. 2022;5:30–46. <https://doi.org/10.31857/S0205961422050037>
Alekseeva T.A., Sokolova J.V., Afanasyeva E.V., Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Kovalev S.M., Smolyanitsky V.M. The contribution of sea-ice contamination to inaccuracies in sea-ice concentration retrieval from satellite microwave radiometry data during the ice melt period. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022;58(12):1470–1484. <https://doi.org/10.1134/S0001433822120039>
 16. Болдырев В.В., Ильгасов П.А., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В. Микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» №1. *Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ*. 2008;107:22–25.
Boldyrev V.V., Ilgasov P.A., Pantsov V.Yu., Prokhorov Yu.N., Strelnikov N.I., Cherny I.V., Chernyavsky G.M., Yakovlev V.V. Microwave scanner/probe MTVZA-GYA spacecraft “Meteor-M” No. 1. *Questions of electromechanics. Proceedings of NPP VNIIEМ*. 2008;107:22–25. (In Russ.)
 17. Чернявский Г.М., Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л., Стрельцов А.М., Евсеев Г.Е., Черный И.В. Моделирование яркостной температуры и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020;17(3):51–65. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65>
Chernyavsky G.M., Mitnik L.M., Kuleshov V.P., Mitnik M.L., Streltsov A.M., Evseev G.E., Cherny I.V. Brightness temperature modeling and first results derived from the MTVZA-GY radiometer of the Meteor-M No. 2-2 satellite. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020;17(3):51–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65>