

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ МОРСКОГО ЛЬДА НА ОШИБКИ В ОПРЕДЕЛЕНИИ СПЛОЧЕННОСТИ В ПЕРИОД ТАЯНИЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ

© 2022 г. Т. А. Алексеева^{a, b, *}, Ю. В. Соколова^{a, b}, Е. В. Афанасьева^{a, b}, В. В. Тихонов^{b, c},
М. Д. Раев^b, Е. А. Шарков^b, С. М. Ковалев^a, В. М. Смоляницкий^a

^aФГБУ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

^bИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^cИнститут водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, Барнаул, Россия

*E-mail: taa@aari.ru

Поступила в редакцию 28.06.2022 г.

На определение сплоченности морского льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии влияет множество природных факторов, один из которых – загрязненность, рассматривается в данной работе. На примере припая Восточно-Сибирского моря проанализированы значения сплоченности, полученные с помощью шести алгоритмов ASI, TUD, OSI-401-b, BT, NT и CDR, выбранных для исследования исходя из доступности данных, а также их широкого использования и популярности в научных исследованиях. Результаты показали, что в период интенсивного таяния с конца мая по начало июля все алгоритмы показывают более низкие значения сплоченности в загрязненных льдах, чем в чистых, но наиболее чувствительны к загрязненности два алгоритма ASI и TUD, что обусловлено использованием в них высокочастотного канала 85-91 ГГц.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, спутниковая микроволновая радиометрия, припай, разрушенность, загрязненность

DOI: 10.31857/S0205961422050037

ВВЕДЕНИЕ

Данные спутниковой микроволновой радиометрии имеют большое значение для решения ряда научных и практических задач. Эти данные являются основным источником информации об изменении площади ледяного покрова с 1978 г., когда начал работу сканирующий многоканальный микроволновый радиометр SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) на борту искусственного спутника Земли (ИСЗ) Nimbus-7. В настоящее время регулярные данные пассивного микроволнового зондирования полярных регионов поступают с радиометров SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) и AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer) (Митник и Митник, 2005). Для расчета сплоченности морского льда по значениям яркостной температуры, получаемой с этих радиометров, уже разработано множество алгоритмов (например, NASA Team, Nasa Team 2, Bootstrap, ASI, NORSEX, Bristol, CalVal и т.д.), а также постоянно разрабатываются новые алгоритмы. Такое разнообразие алгоритмов и непрерывная работа научного сообщества по их усовершенствованию обусловлены тем, что до сих пор ни один из них не дает абсолютно точные значения сплоченности морского льда. При

расчетах крайне сложно учесть все разнообразие природных процессов, оказывающих влияние на итоговые результаты. При создании алгоритмов применяются различные каналы (от 6.925 до 91.655 ГГц) на горизонтальной и вертикальной поляризации и методы (Тихонов и др., 2016). Таким образом, значения сплоченности морского льда, получаемые с помощью различных алгоритмов, могут существенно различаться и у каждого алгоритма есть свои преимущества и недостатки (Ivanova et al., 2015).

В работе (Alekseeva et al., 2019) были представлены результаты сравнения данных спутниковой микроволновой радиометрии с данными специальных судовых наблюдений в Арктике, анализ изменчивости средних ошибок определения сплоченности морского льда по данным алгоритмов NASA Team, ASI и VASIA2 для различных градаций сплоченности и влияние на ошибки начальных видов льда, стадии разрушенности, размеров ледяных полей и загрязненности.

В работе (Алексеева et al., 2021) подробно рассматривается влияние загрязненности морского льда различного происхождения на занижение его сплоченности, полученной по данным спутниковой микроволновой радиометрии. Загряз-

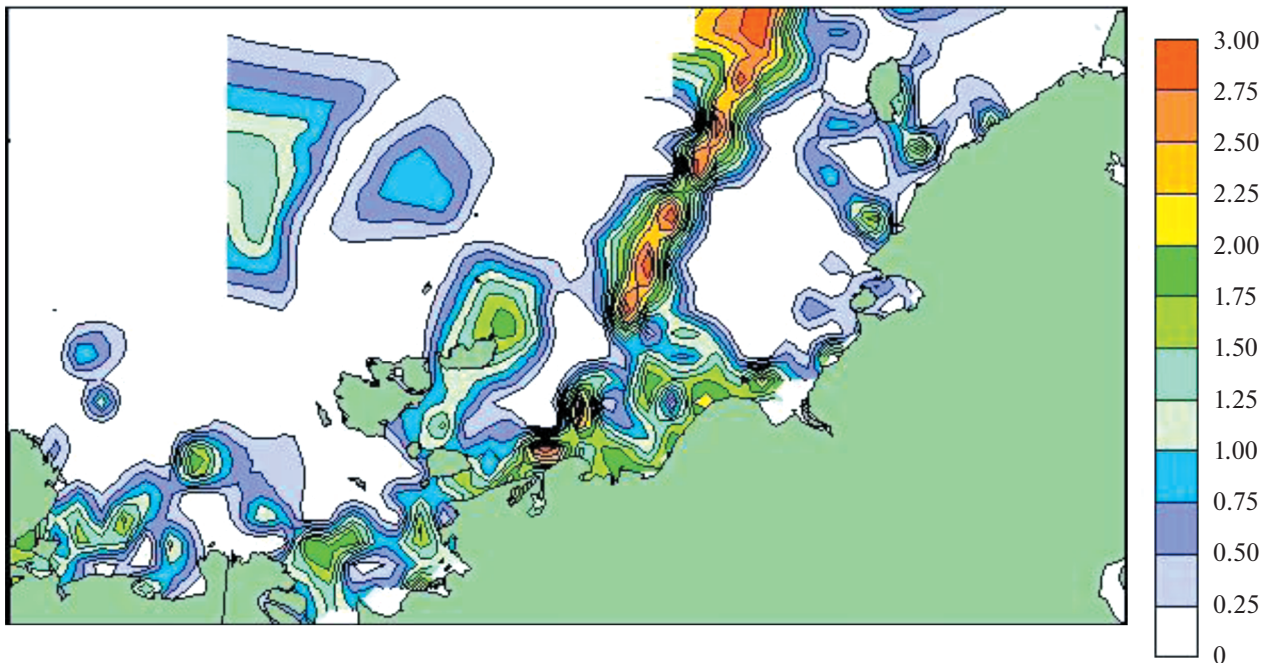


Рис. 1. Загрязненность морского льда в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море в июле на основе данных авиаразведок ААНИИ за период 1953–1976 гг. Шкала загрязненности определяется по 3-бальной шкале (Smolyanitsky et al., 2003; Алексеева и др., 2021).

ненные льды в Арктике занимают обширные площади. Однако точных данных о распределении и количестве загрязненных льдов на данный момент нет. Не отрицая прогресс в использовании оптической информации ИСЗ для оценки отдельных включений в морской лед, например биогенных (Babin et al., 2015), отметим, что получить наиболее точную информацию о степени загрязненности морских льдов в настоящее время возможно только с помощью визуальных наблюдений с борта судна за выворотами льдин по ходу движения или по непосредственным количественным измерениям в кернах. Наиболее масштабные данные о загрязненности в историческом плане были получены в XX в. во время ледовых авиаразведок ААНИИ. На рис. 1 представлена обобщенная карта зон загрязненности морского льда в Лаптевых и Восточно-Сибирском морях в июле 1953–1976 гг. (Smolyanitsky et al., 2003).

Загрязнение морского льда может быть органического и неорганического характера. Вещества органического происхождения попадают на лед в основном при замерзании и в период таяния, когда в снежниках развиваются колонии микроскопических диатомовых водорослей, а частицы неорганического происхождения — со дна моря на мелководье, в результате материкового стока и ветровой эрозии суши (Иванов, 2007). Обширные зоны загрязненных льдов формируются в прибрежных мелководных районах, при

одновременном воздействии нескольких факторов во время процессов ледообразования: глубины не более 50 м, турбулентность, сильные ветры. Также в мелководных районах с сильной турбулентностью, при формировании донного льда, в кристаллы льда вмораживаются частицы донных осадков. Впоследствии донный лед всплывает и становится частью ледяного покрова на поверхности моря (Reimnitz et al., 1993; Narasyn et al., 2019). В загрязненность льда неорганическими включениями вносит свою долю и вспахивание дна айсбергами и массивными торосами, киль которых может достигать дна на мелководье. Часть загрязнений является следствием хозяйственной деятельности человека в Арктике, которая увеличивается с каждым годом (Бондур и др., 2016).

Грязь на поверхности льда обычно распространена неравномерно, и количество ее меняется в течение года. В зимне–весенний период, во время нарастания ледяного покрова, загрязненность льда невозможно определить визуально по спутниковым снимкам или путем ледовой авиаразведки, так как загрязнения залегают слоями в толще льда, и сверху прикрыты снежным покровом. В этот период возможно определение загрязненности только с борта ледокола (визуальная оценка загрязненности по выворотам льдин) или с помощью бурения льда (рис. 2, а), но таких данных очень мало. Загрязненность носит слоистый характер, слои с максимальными концентрация-

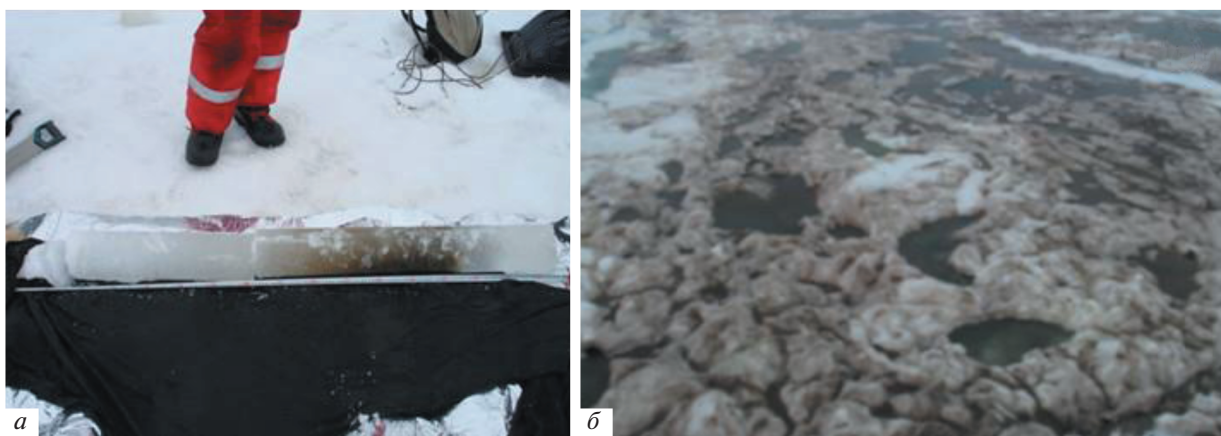


Рис. 2. Пример загрязненного морского льда: *а* – керн льда, выбуренный в припае (май 2008 г. Анадырский лиман, Берингово море); *б* – поверхность сильно загрязненного льда в период таяния (август 2016 г., побережье полуострова Таймыр, море Лаптевых).

ми загрязнений чаще расположены ближе к поверхности льда (Аппель и Гудкович, 1979). В начале лета, в процессе таяния на последних стадиях разрушенности, после полного исчезновения с поверхности льда снежного покрова, начинается вытаивание этих слоев. Этот процесс приводит к повышенной концентрации отложений в снежниках и ускорению их сквозного протаивания (Иванов, 2007), а также более высокой концентрации загрязнения на поверхности льда (рис. 2, б).

Загрязненность может влиять на яркостную температуру поверхности льда как прямым, так и косвенным образом. Косвенное влияние заключается в том, что в период интенсивных процессов таяния загрязненные льды разрушаются быстрее, так как альбедо загрязненной поверхности меньше, чем незагрязненной в среднем на 0.2–0.3. Это способствует увеличению в среднем на 40% количества тепла, поступающего за счет солнечного излучения, что приводит к более интенсивному прогреву приледного слоя воздуха и усилению “контактного” таяния по сравнению с “радиационным” (Аппель и Гудкович, 1979; Брызгин, 1959). Прямое воздействие проявляется в период, когда лед находится в сильной стадии разрушенности – уменьшается количество снежников на поверхности льда из-за протаивания сквозных трещин, куда стекает талая вода с поверхности. Лед выглядит, как показано на рис. 2, б – поверхность ледяного покрова схожа с поверхностью очень влажной почвы (грунта) (Алексеева и др., 2021). Для высокочастотного канала (85–91 ГГц), который использует ряд алгоритмов (ASI, NT2, TUD и др.), различия в излучательной способности очень влажной почвы и водной поверхности незначительны (Ulaby and Long, 2014; Emery and Camps, 2017), поэтому грязный лед идентифицируется такими алгоритмами, как водная поверхность, или лед низкой сплоченности.

Таким образом, загрязненность льда может оказывать существенное влияние на точность определения сплоченности морского льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии в период таяния. Анализ современных публикаций показал, что до настоящего времени еще не проводились исследования о том, какой вклад вносит загрязненность в недооценку площади морского льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии и как реагируют на загрязненность различные алгоритмы. Связано это с недостатком исходных точных данных о пространственном распределении загрязненных льдов. Помимо этого, сложно отделить влияние загрязненности от влияния процессов таяния (наличия талой воды на поверхности льда), так как эти два фактора проявляются одновременно.

Для оценки влияния загрязненности на определение сплоченности морского льда мы исследовали припай в Восточно-Сибирском море. Мощный устойчивый припай в данном районе представляет идеальный объект для отслеживания изменений состояния поверхности льда в период таяния, так как сохраняется неизменным в пространстве положение основных элементов поверхности. При этом известна толщина льда по данным близлежащих полярных станций и неизменна десятибалльная сплоченность льда до тех пор, пока припай не взломался, в отличие от дрейфующих льдов, где сложнее отследить изменения характеристик поверхности льда в одной и той же точке из-за их непрерывного перемещения и изменения сплоченности.

Для анализа были выбраны 6 алгоритмов: Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study Sea Ice (ASI), Bootstrap (BT), NASA Team (NT), три гибридных алгоритма Climate Data Record (CDR), Technical University of Denmark (TUD) и один из алгоритмов Ocean and Sea Ice Satellite Application

Facility (OSI SAF) – OSI-401-b. Эти шесть алгоритмов были выбраны исходя из доступности данных, что, соответственно, приводит к широкому их использованию и популярности в научных исследованиях.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Данные спутниковой микроволновой радиометрии.

В исследовании использовались продукты уровня L3, содержащие в себе информацию о сплоченности морского льда, рассчитанной по шести алгоритмам.

ASI. Алгоритм ASI (ARTIST Sea Ice) разработан коллективом Бременского университета. Он базируется на расчете поляризационной разности яркостных температур высокочастотного канала (89 ГГц для AMSR2 и 91.655 ГГц для SSMIS). Поскольку для этого канала существенно влияние атмосферы, то дополнительно, в качестве погодных фильтров, используется градиентное соотношение пар каналов 36–37 и 18–19 ГГц и 22–23 и 18–19 ГГц вертикальной поляризации, а также алгоритм Bootstrap для уменьшения ее эффектов. Ежедневные расчеты сплоченности льда по Арктике доступны на сайте <https://seaice.uni-breiten.de/>. Для анализа были взяты результаты обработки данных радиометра AMSR-2 (ASI v.5.4) с разрешением 6.25 км (Spreen et al., 2008).

NasaTeam (NT), Bootstrap (BT), NOAA/NSIDC Sea Ice Concentration Climate Data Record (CDR). Алгоритмы NT (Cavalieri et al., 1984) и BT (Comiso, 1986) разработаны в NASA Goddard Space Flight Center (GSFC). Алгоритм NT базируется на поляризационных и градиентных соотношениях для яркостных температур в разных каналах и поляризациях. Алгоритм BT основывается на соотношениях яркостных температур в разных каналах. В данной работе используются расчеты BT версии 3.1 (Comiso et al., 2017). Алгоритм NT использует канал 19.35 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации и канал 37 ГГц вертикальной поляризации. BT использует канал 37 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации и канал 19.35 ГГц вертикальной поляризации.

Алгоритмы NT и BT являются основой алгоритма CDR (Meier and Windnagel, 2021). Для каждого пикселя на поверхности определяется наибольшее из двух значений сплоченности морского льда, определенных по NT и BT, поскольку известно, что оба алгоритма недооценивают сплоченность. Кроме этого, CDR использует порог сплоченности 10% по BT для определения кромки льда.

Сплоченности ледяного покрова, рассчитанные по алгоритмам NT, BT и CDR были получены на сайте NSIDC в составе продуктов NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration (<https://nsidc.org/data/g02202/versions/4/>) и

Near-Real-Time NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration (<https://nsidc.org/data/G10016/versions/2/>). В работе использовались результаты обработки данных радиометра SSMIS с разрешением 25 км.

OSI-401-b (OSI SAF). Алгоритм OSI-401-b (Tonboe and Lavelle, 2016) был разработан в рамках консорциума OSI SAF (Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility) Норвежским и Датским метеорологическими институтами. OSI-401-b – это гибридный алгоритм, созданный на основе двух концептуально похожих алгоритмов: Bristol (Smith, 1996) и Bootstrap frequency mode (BFM) (Comiso, 1986). Первый использует каналы 37 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации и 19 ГГц вертикальной поляризации, второй – каналы 37 и 19.35 ГГц вертикальной поляризации. Для обеспечения оптимальных расчетов в прикромочной зоне и в сплоченном льду используются достоинства каждого алгоритма: для алгоритма Bristol вводится меньший весовой коэффициент при сплоченностях ниже 40%, в то время как алгоритму BFM присваивается меньший вес при сплоченностях выше 40%, поскольку Bristol показывает лучшие результаты для сплошного льда, а BFM – для областей с открытой водой. В работе использовались результаты обработки данных радиометра SSMIS, представленные в сетке с шагом 10 км. Данные были получены с сервера Норвежского метеорологического института <ftp://osisaf.met.no/>.

TUD (OSI-408). OSI-408 (Tian et al., 2015) – это продукт, включающий 2 набора данных, которые были получены по двум алгоритмам: OSISAF и TUD. Продукт TUD был разработан в рамках консорциума OSI SAF (Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility) Норвежским и Датским метеорологическими институтами. Алгоритм TUD – это тот же гибридный алгоритм OSI-401-b, только рассчитывается по данным AMSR. TUD базируется на алгоритме Bootstrap (Comiso, 1986; Comiso et al., 1997) с использованием высокочастотного канала 89 ГГц (Pedersen, 1998). Первоначально вычисляется сплоченность по алгоритму BFM, после чего анализируются ее значения. Если сплоченность выше нуля, то используется канал 89 ГГц с динамическими точками привязки. Если значение сплоченности равняется нулю, то это значение сохраняется (ESA SICC1 report, 2013). В работе использовались результаты обработки данных радиометра AMSR-2, представленные в сетке с шагом 10 км. Данные были получены с сервера Норвежского метеорологического института <ftp://osisaf.met.no/>.

*Спутниковые снимки в видимом диапазоне
электромагнитного спектра*

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Для визуального анализа характери-

стик морского льда использовались спутниковые данные MODIS метеорологических спутников Terra и Aqua (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>). Для дешифрирования использовались композитные изображения с разрешением 250 метров, составленные из каналов видимого диапазона (Band 1: 0.62–0.67 мкм, Band 4: 0.545–0.565 мкм, Band 3: 0.459–0.479 мкм).

Landsat-8 и Sentinel-2. Для детального дешифрирования характеристик морского льда привлекались данные более высокого разрешения, со спутников Landsat-8 (прибор OLI) и Sentinel-2 (прибор MSI) (<https://scihub.copernicus.eu/>). Композитные изображения составлялись из каналов видимого диапазона (0.48–0.66 мкм; каналы № 2, 3 и 4 для обоих радиометров). Пространственное разрешение снимков Landsat-8 – 30 м, Sentinel-2 – 10 м. Данные Landsat-8 брались с сайта USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), данные Sentinel-2 были получены на портале космической программы Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Процессы формирования и разрушения припая в Восточно-Сибирском море. Выявление загрязненных льдов по спутниковым данным в видимом диапазоне

По данным ледовой авиаразведки, проводившейся в середине XX в. (рис. 1), наиболее загрязненные льды наблюдались в западной части Восточно-Сибирского моря. В этом регионе, а также в Новосибирских проливах формируется лед преимущественно местного происхождения. В первой декаде октября вдоль побережья островов и материкового побережья начинает формироваться припай. К концу октября средняя толщина припая составляет уже 33 см. Со второй декады ноября замерзают проливы Новосибирских островов, а с третьей декады декабря припай занимает всю площадь акватории между Новосибирскими островами и побережьем материка до меридиана 150° в.д. Максимальное развитие припая наблюдается в апреле (толщина 210 см) (Шаратунова и Иванов, 2018). Нарастание ледяного покрова заканчивается в мае, а в конце мая – начале июня в прибрежной зоне на льду появляются снежницы (лужи талой воды на поверхности льда) – первые признаки таяния, которые затем распространяются в северные районы моря (Юлин и др., 2018).

Для анализа влияния загрязненности на определение сплоченности по данным спутниковой микроволновой радиометрии было детально изучено состояние припая в Восточно-Сибирском море в зимний период 2020/2021 гг. На рис. 3 и 4 приведены спутниковые снимки в видимом диапазоне, которые отображают ключевые моменты

в формировании припая и основные признаки разрушенности и загрязненности поверхности льда.

На рис. 3, для общего представления районов формирования загрязненных льдов, показана обобщенная карта зон загрязненности морского льда в Восточно-Сибирском море в июле 1953–1976 гг., полученная по данным авиаразведок, а также подобраны соответствующие данному району, частично свободные от облачности снимки в видимом диапазоне (Terra MODIS) для лета 2020 г. Летом, предшествующем рассматриваемому периоду, на спутниковых снимках (рис. 3, б и 3, в) можно увидеть мелководные прибрежные районы с водой более мутного цвета вблизи берегов, обозначенные на рисунках коричневым контуром и цифрой 1. В летний период, когда акватория полностью очистилась от льда, не нашлось снимков, полностью свободных от облачности, поэтому исследуемый район показан на двух изображениях: 3, б – открыта центральная и восточная часть района, и 3, в – открыта его западная часть.

Анализ спутниковых изображений показал, что осенью 2020 г. формирование ледяного покрова на открытой воде происходило очень интенсивно в конце октября–начале ноября. Загрязненный лед на участках, выбранных для анализа в данной работе, был сформирован именно в этот период активного осеннего ледообразования. Участки чистого ледяного покрова были сформированы позднее в течение зимнего сезона в заприпайных полыньях, а также на пространствах открытой воды между ледяными полями, находившимися на расплыве (то есть во льду, разредившемся после сжатия). Таким образом, лед, обозначенный в данной работе как чистый, по возрасту является более молодым, чем загрязненный.

С октября происходило непрерывное нарастание толщины и площади припая, и в первой декаде марта 2021 г. припай достиг максимальной площади развития. С марта по май наблюдались незначительное нарастание площади припая или его частичный взлом на кромке, а также нарастание толщины льда, которое отслеживалось по данным, поступающим с полярных станций Амбарчик, Раучуа, Айон, Певек и Валькаркай.

На рис. 4, а отображено состояние припая в Восточно-Сибирском море на пике его развития, то есть при максимальных значениях площади и толщины льда, а также максимальной заснеженности, непосредственно перед появлением первых признаков таяния, различимых на спутниковых изображениях. На рис. 4, б показано состояние припая в конце мая. За счет интенсивного процесса таяния в некоторых районах снежный покров уже протаял и появились первые обширные снежницы в Чаунской губе и вдоль континентального побережья. Именно в этот период

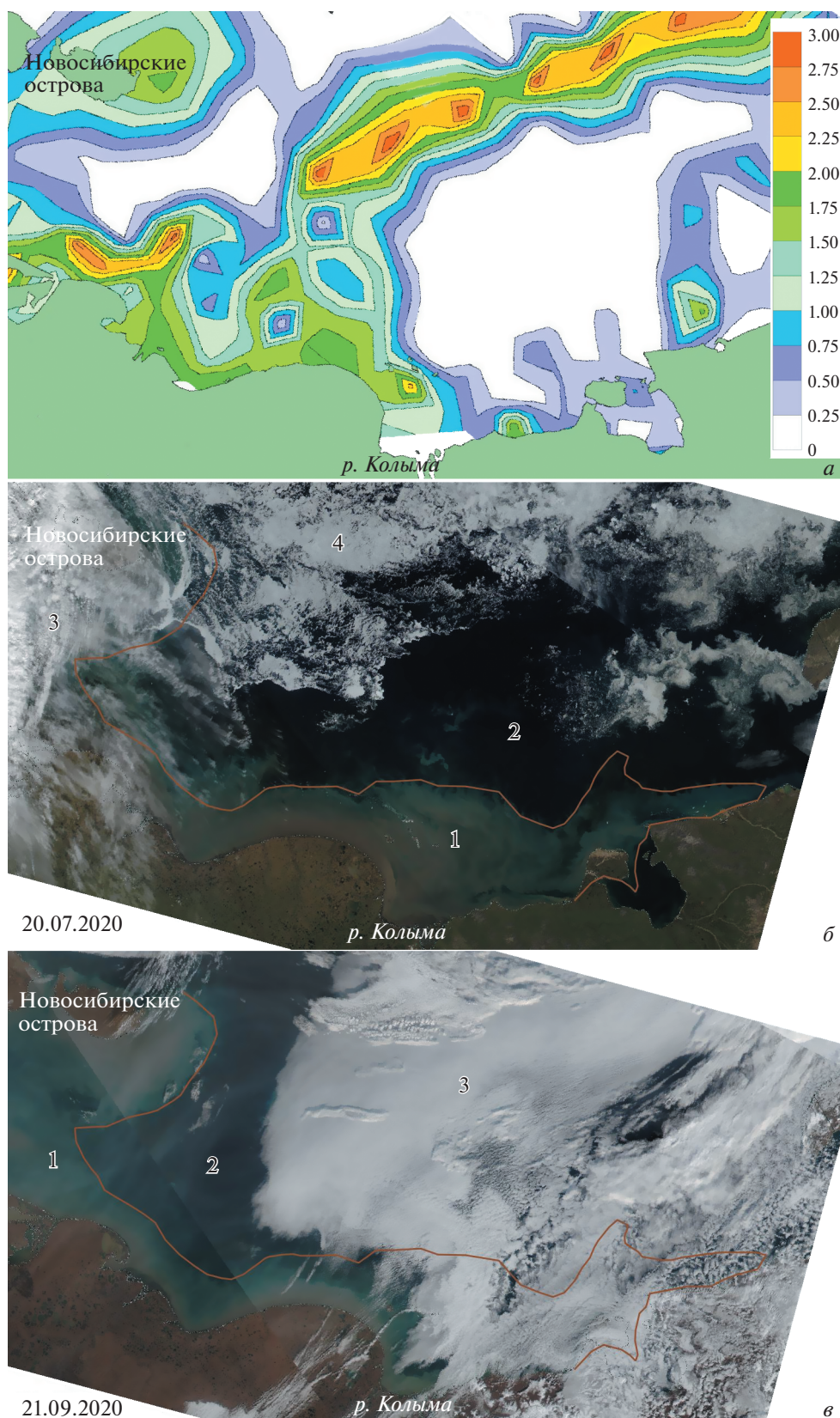


Рис. 3. Район исследования – Восточно-Сибирское море: *а* – карта зон загрязненности морского льда в июле 1953–1976 гг. по данным авиаразведки (в баллах). Снимки в видимом диапазоне (Terra MODIS): *б* – от 20 июля 2020 г.; *в* – 21 сентября 2020 г. Цифрами и линиями на рисунке обозначены: 1 и коричневый контур – мелководная область, свободная ото льда, 2 – более глубокие районы, свободные ото льда, 3 – облачность, 4 – дрейфующие льды.

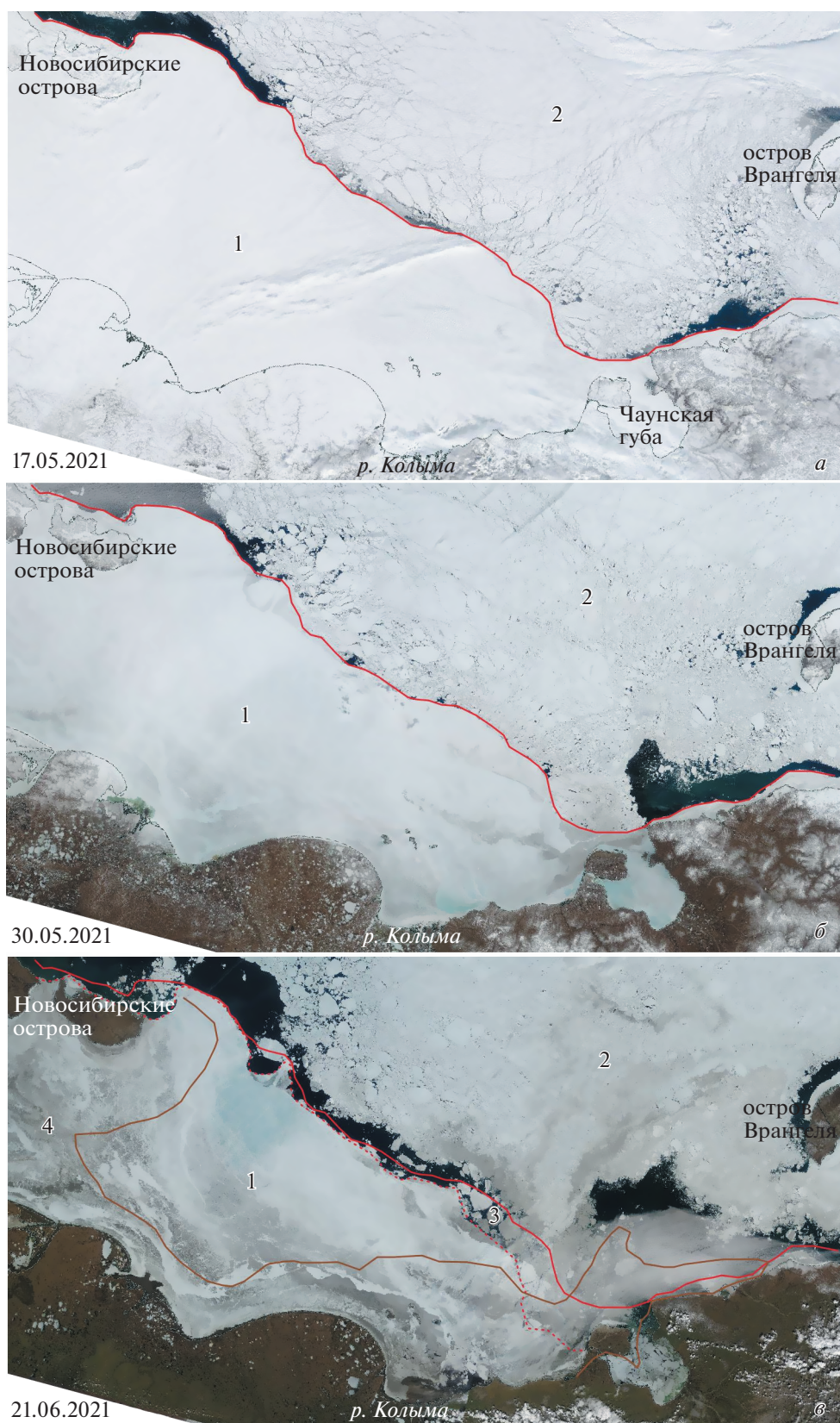


Рис. 4. Район исследования – Восточно-Сибирское море, снимки в видимом диапазоне (Terra MODIS): *а* – 17 мая 2021 г., *б* – 30 мая 2021 г., *в* – 21 июня 2021 г. Цифрами и линиями на рисунке обозначены: 1 – припай, 2 – дрейфующий лед, 3 – частично взломавшийся припай, 4 и коричневый контур – область, соответствующая мелководью на рис. 3, *б*, *в*.

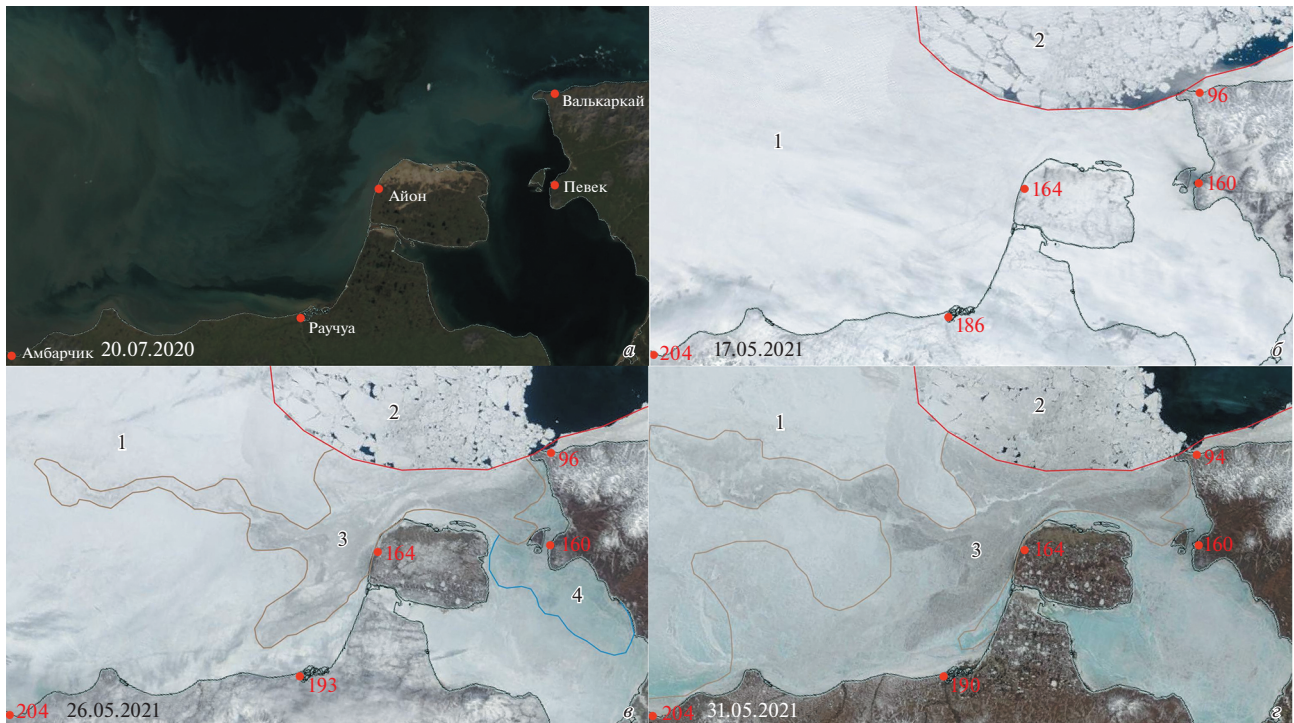


Рис. 5. Район острова Айон. Снимки в видимом диапазоне Terra MODIS: *а* – 20 июля 2020 г., *б* – 17 мая 2021 г., *в* – 26 мая 2021 г., *з* – 31 мая 2021 г. Цифрами и линиями на рисунке обозначены: 1 – сплошной неразрушенный припай (то есть сплоченность льда 10 баллов); 2 – дрейфующий лед; 3 и коричневый контур – подтаявший загрязненный лед; 4 и синий контур – подтаявший чистый лед. Красными цифрами отмечена толщина льда, измеренная на полярных станциях.

можно наблюдать изменение цвета поверхности припая, которое мы рассмотрим подробнее на рис. 5 и 6. На рис. 4, *в* уже можно наблюдать, что 21 июня таянию была подвержена вся площадь припая: большая часть снега вытаяла, и вся поверхность льда покрылась талой водой, начали отламываться куски припая у его границы.

Обратим особое внимание на то, что загрязненный припай можно ошибочно принять за подтаявший более тонкий лед: на снимках 4, *б* и 4, *в* более темный тон некоторых областей припая выглядит более тонким, как будто сквозь лед визуально “просвечивает” темная вода. Однако в данном географическом районе к концу мая толщина припая на всем его протяжении составляет от 1.5 до 2 м, а более темные области – это загрязненная поверхность льда, которая “оголилась” и стала видимой после стаивания снега.

На рис. 5 и 6 представлены спутниковые изображения, отображающие процессы, происходящие в период активного таяния в припайном льду вблизи острова Айон в более крупном масштабе. На снимке от 20 июля 2020 г. видны мелководные зоны (более мутный, светлый цвет вблизи берегов), в которых формируются условия, благоприятствующие появлению загрязненных льдов (рис. 5, *а*). На рис. 5, *б*, 5, *в* и 5, *з* представлен процесс таяния льдов в мае с постепенным

очищением поверхности от снежного покрова и появлением снежиц, в результате чего становится видимым загрязненный поверхностный слой припая. На рис. 5, *а* отмечено местоположение полярных станций Амбарчик, Раучуа, Айон, Певек и Валькаркай, а на рис. 5, *б*, 5, *в* и 5, *з* нанесены значения толщины припая, измеренные на этих станциях 17, 26 и 31 мая 2021 г. соответственно. 26 мая 2021 г. толщина припая в исследуемом районе была максимальной и составляла от 96 см в районе станции Валькаркай до 204 см в районе станции Амбарчик.

На рис. 6, *а* для подтверждения того, что более темный цвет припайного льда обусловлен его загрязненностью, мы наложили поверх снимков Terra MODIS снимки Sentinel-2A с более высоким разрешением, на которых загрязненные подтаявшие льды отображаются почти черным цветом (зона 3 на верхнем снимке Sentinel-2A, рис. 6, *а*), а подтаявшие чистые льды – ярким голубым (зона 4 на нижнем снимке Sentinel-2A, рис. 6, *а*). Такое четкое выделение загрязненности на снимке Sentinel-2A (зона 3, рис. 6, *а*) получено за счет сильного контрастирования снимка во время его обработки. На снимке от 6 июня (рис. 6, *б*) загрязненные льды выделяются наиболее четко (зона 3). В этот же день начался частичный взлом припая на его кромке (зона 5), в связи с чем измерения

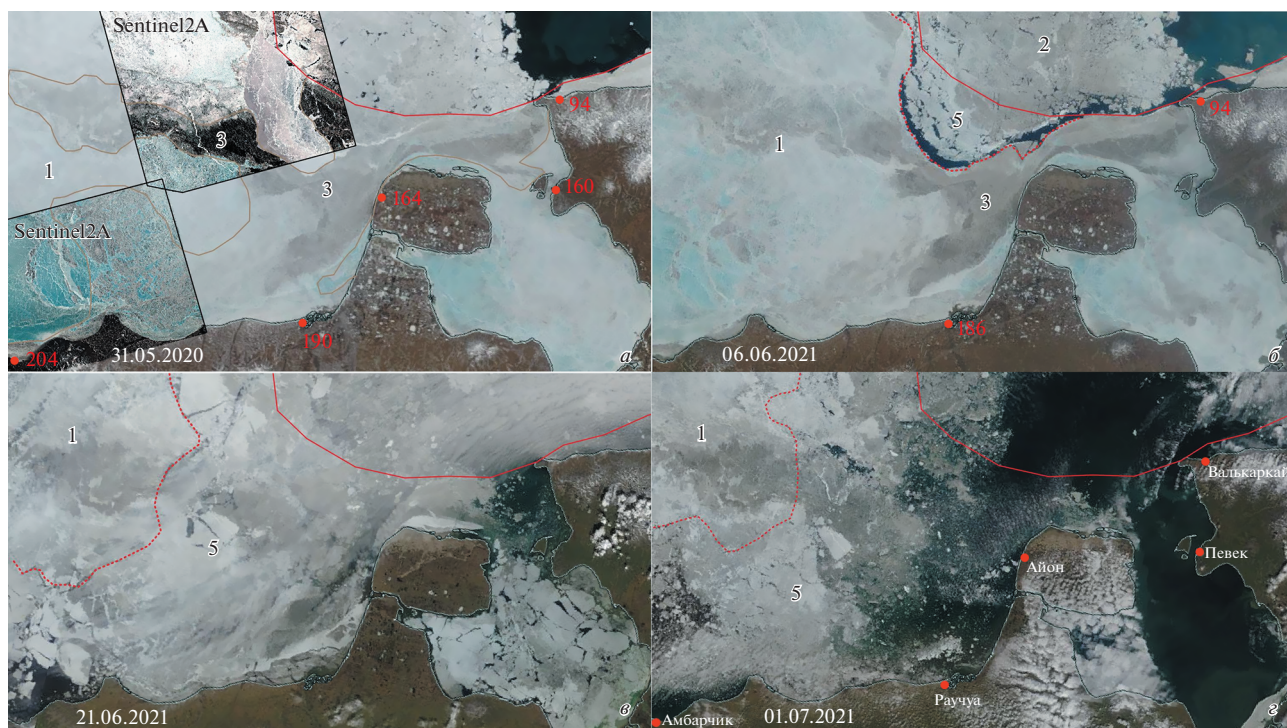


Рис. 6. Район острова Айон. Снимки в видимом диапазоне Terra MODIS: *а* (на снимок Terra MODIS наложены два снимка Sentinel-2A за ту же дату) – 31 мая 2021 г., *б* – 06 июня 2021 г., *в* – 21 июня 2021 г., *г* – 01 июля 2021 г. Цифрами и линиями на рисунке обозначены: 1 – сплошной неразрушенный припай (то есть сплоченность льда 10 баллов), 2 – дрейфующий лед, 3 – подтаявший загрязненный лед, 4 – подтаявший чистый лед, 5 – взломанный не сплошной припай. Красными цифрами отмечена толщина льда, измеренная на полярных станциях.

толщины льда на всех береговых станциях далее были прекращены. Так, 6 июня были получены последние данные о толщине припая на станциях Раучуа (186 см) и Валькаркай (94 см), а на других станциях данные уже некоторое время отсутствовали, так как началось активное разрушение припая у берега. 21 июня (рис. 6, *в*) произошло практически полное разрушение припая, а уже 1 июля (рис. 6, *г*) весь лед частично растаял, а частично был вынесен к северу. На рис. 6, *в* и 6, *г* уже сложно четко определить границы загрязненных льдов, поэтому анализ влияния загрязненности льда на определение сплоченности по данным спутниковой микроволновой радиометрии производился до момента взлома припая.

Определение сплоченности загрязненных морских льдов по данным спутниковой микроволновой радиометрии

Рассмотрим карты сплоченности, построенные по данным спутниковой микроволновой радиометрии с помощью одного из выбранных для анализа алгоритмов – ASI (рис. 7). Для первой карты на рис. 7, *а* соответствующий снимок Terra MODIS в видимом диапазоне приведен на рис. 5, *б*. 17 мая 2021 г. температура воздуха только начала переходить от отрицательных температур к поло-

жительным и, соответственно, видимых признаков таяния еще не наблюдалось, снежный покров еще полностью покрывал поверхность припая (рис. 5, *б*), поэтому алгоритм ASI очень точно отобразил сплошной припайный лед, то есть 10 баллов сплоченности на всей его площади (рис. 7, *а*). 26 мая 2021 г. температура воздуха уже поднялась выше 0°C и на снимке в видимом диапазоне стало хорошо заметно начало таяния чистого льда в районе станции Певек (зона 4 на рис. 5, *в*) и грязного льда к западу от острова Айон (зона 3 на рис. 5, *в*). Эти зоны, покрытые снежниками, на рис. 7, *б* отображаются более низкой сплоченностью, несмотря на то, что припай еще не начал разрушаться и по-прежнему сохраняется сплошным покровом в прежних границах. Обратим внимание на снимок, представленный на рис. 5, *г* и 6, *а* от 31 мая 2021 г., где коричневым контуром выделена уже проявившаяся на поверхности загрязненность льда. На карте сплоченности (рис. 7, *в*) четко видно, что именно внутри этой зоны алгоритм ASI сильнее занижает сплоченность льда, чем вне контуров загрязненной зоны, хотя степень разрушенности в пределах всей области снимка – одинаковая. 1 июля 2021 г. к западу от острова Айон начался интенсивный взлом припая, и уменьшение сплоченности произошло уже за счет освобождения поверхности моря ото льда (сравн. рис. 6, *г* и

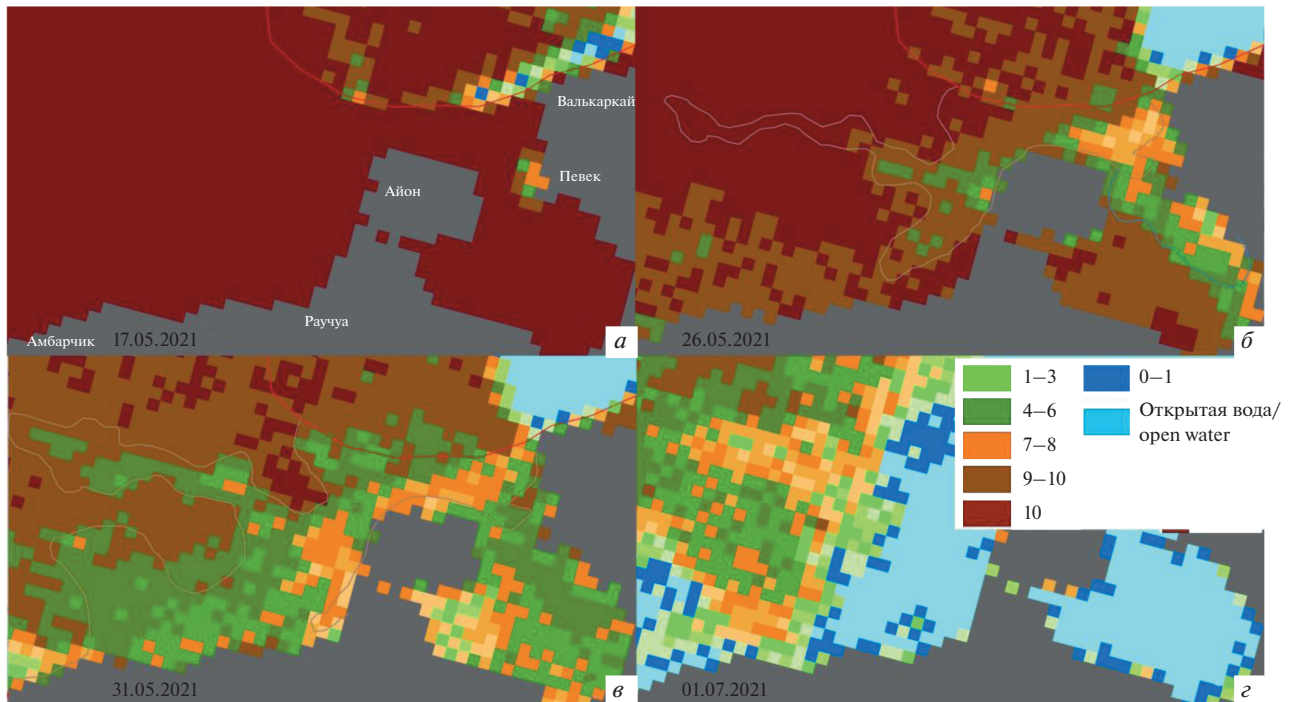


Рис. 7. Район острова Айон. Карты сплоченности морского льда, построенные по данным спутниковой микроволновой радиометрии с помощью алгоритма ASI: *а* – 17 мая 2021 г., *б* – 26 мая 2021 г., *в* – 31 мая 2021 г., *з* – 1 июля 2021 г.

рис. 7, з). Таким образом, визуально можно определить, что не только разрушенность, но и загрязненность льда в определенный период таяния оказывает влияние на занижение сплоченности алгоритмом ASI.

Для анализа влияния загрязненности на определение сплоченности морского льда, полученной различными алгоритмами по данным спутниковой микроволновой радиометрии, были выбраны 7 пар расположенных рядом друг с другом точек. Точки выбирались с разной степенью загрязненности, но с максимально схожими другими характеристиками: одинаковой сплоченностью льда (сплошной лед – припай, 10 баллов), историей нарастания и разрушения. Положение выбранных точек отображено на рис. 8. На рис. 9 и 10 приводится изменение значений сплоченности, рассчитанной по алгоритмам ASI, TUD, OSI-401-b, BT, NT и CDR. На каждом графике кривые сплоченности заканчиваются в день взлома припая в каждой точке, то есть в тот день, когда фактическая сплоченность льда становилась ниже 10 баллов. Соответственно, по графикам на рис. 9 и 10 можно проследить, насколько каждый алгоритм недооценивает реальную сплоченность морского льда и, зная течение природных процессов в каждой точке, можно отследить влияние степени разрушенности на каждый алгоритм. Также на рис. 9 и 10 приводится температура воздуха на 12 ч каждого дня и осадки, полученные из Интернет-ресурса чешской метеорологической

компании InMeteo <https://www.ventusky.com/> для каждой точки.

Процесс разрушения припая оценивался визуально путем дешифрирования ежедневных спутниковых изображений Terra (MODIS) в видимом диапазоне (полученных из Интернет-ресурса Национального управления по авиации и исследованию космического пространства США <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>) и радиолокационных изображений спутников Sentinel-1 (полученных из Интернет-ресурса Датского технического университета <http://www.seaice.dk/>). В районе анализируемых точек разрушение припая происходило следующим образом:

- в районе точек 1 и 2 максимальное затопление поверхности льда отмечалось в период со 2 по 5 июня 2021 г., после чего произошло обсыхание льда (то есть накопленная на поверхности вода стекла под лед по образовавшимся во льду трещинам). В точке 2 взлом припая произошел 9–10 июня, а в районе точки 1 на десять дней позже, 20–21 июня. К началу июля лед в данном районе был уже сильно разрежен;

- в районе точек 3 и 4 максимальное затопление льда было отмечено 5–6 июня 2021 г. К 9 июня лед уже полностью обсох. К 14 июня припай в точке 4 растаял, не взламываясь. В районе точки 3 припай взломался 19 июня, а к 28 июня лед был уже сильно разрежен;

- в районе точек 5 и 6 припай был максимально затоплен в период с 5 по 7 июня 2021 г. В точке

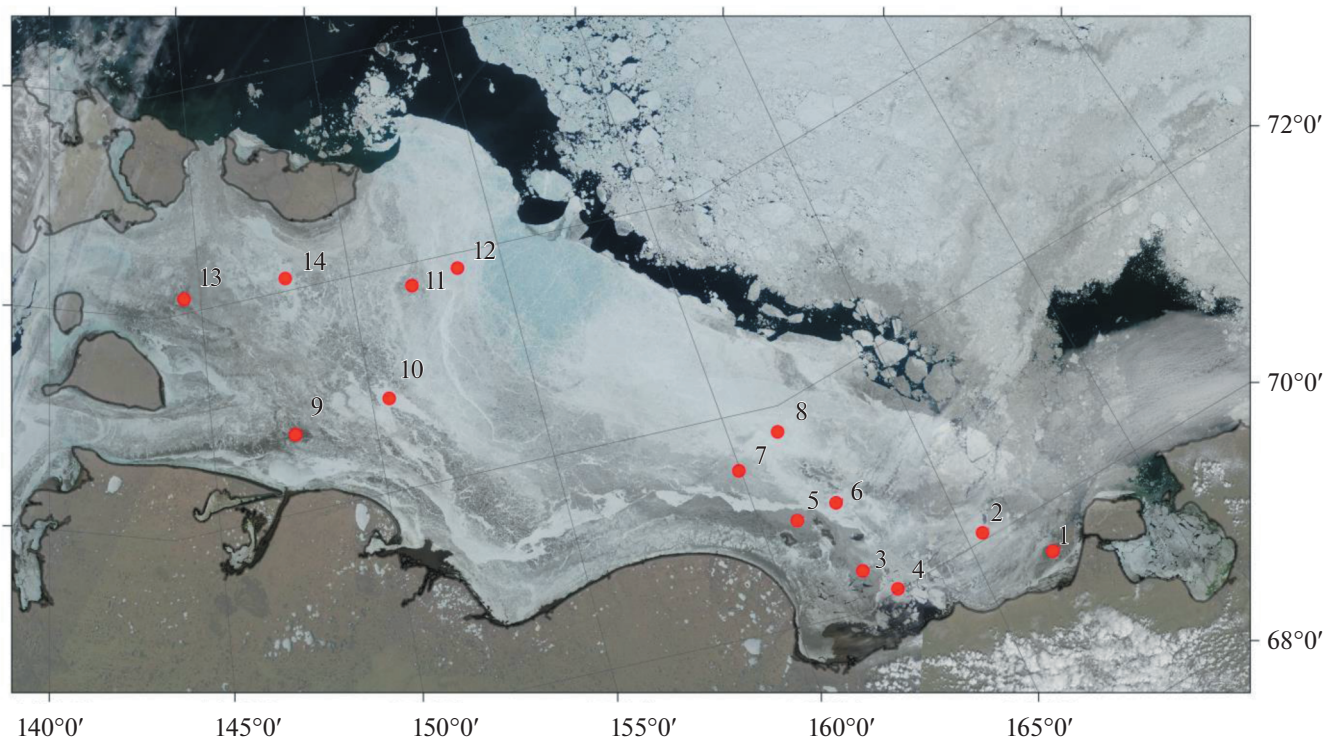


Рис. 8. Восточно-Сибирское море. Расположение точек, в которых проводился анализ влияния загрязненности на данные о сплоченности льда, определенной различными алгоритмами по данным спутниковой микроволновой радиометрии. Снимок Terra MODIS от 21.06.2021.

5 припай взломался в период с 29 июня по 1 июля. В точке 6 лед держался до 3 июля, а затем его вынесло ветром;

– в районе точек 7 и 8 максимальное затопление наблюдалось в период с 6 по 8 июня 2021 г. В отличие от предыдущих случаев, обсыхание льда происходило не моментально, процесс длился с 9 по 16 июня. К 17 июня лед полностью обсох. 26 июня произошел взлом припая, но лед держался большими полями еще до 2 июля. 2–3 июля поля стали разрушаться, и сплоченность ледовой зоны стала падать;

– в районе точек 9 и 10 максимальное затопление отмечалось в несколько разные периоды. Так, в точке 9 припай был максимально затоплен с 3 по 9 июня 2021 г. В точке 10 затопление наблюдалось чуть позже – с 4 по 14 июня. Взлом припая произошел 26 июня. В районе точки 9 взломанный лед дрейфовал сразу, а в районе точки 10 лед держался большими полями до 1 июля, затем зона также разрушилась;

– в районе точек 11 и 12, в отличие от предыдущих случаев, очень сильного затопления не наблюдалось, максимальное количество снежника отмечалось 15–17 июня. К 19–20 июня лед полностью обсох. Взлом припая произошел 26–27 июня. До 30 июня лед держался на месте, а затем начал дрейфовать;

– в районе точек 13 и 14 процессы также проходили немного по-разному. В точке 13 сложно выделить дату максимального затопления (возможно, из-за сильной торосистости). В точке 14 припай был максимально затоплен 13–15 июня, после чего произошло обсыхание льда. 26 июня в данном районе произошел взлом припая, но лед еще продолжал держаться на месте до 30 июня, а затем начал смещаться.

Все вышеперечисленные процессы в каждой точке четко прослеживаются на графиках временной изменчивости сплоченности льда, представленных на рис. 9 и 10. До начала таяния во всех точках все алгоритмы показывают 10 баллов сплоченности (с редкими отклонениями в пределах 1 балла). Далее, к моменту максимального затопления поверхности льда талой водой, все алгоритмы, с небольшими исключениями, показывают минимальные значения сплоченности, то есть максимально недооценивают фактическую сплоченность льда. Затем, с момента начала обсыхания льда, значения сплоченности снова увеличиваются, ошибка становится меньше. И, наконец, сплоченность снова начинает занижаться при максимальном разрушении припая до момента его окончательного взлома. На всех графиках наблюдаются более низкие значения сплоченности с конца мая по конец июня в точках с загрязненным льдом, по сравнению с точками с чистым

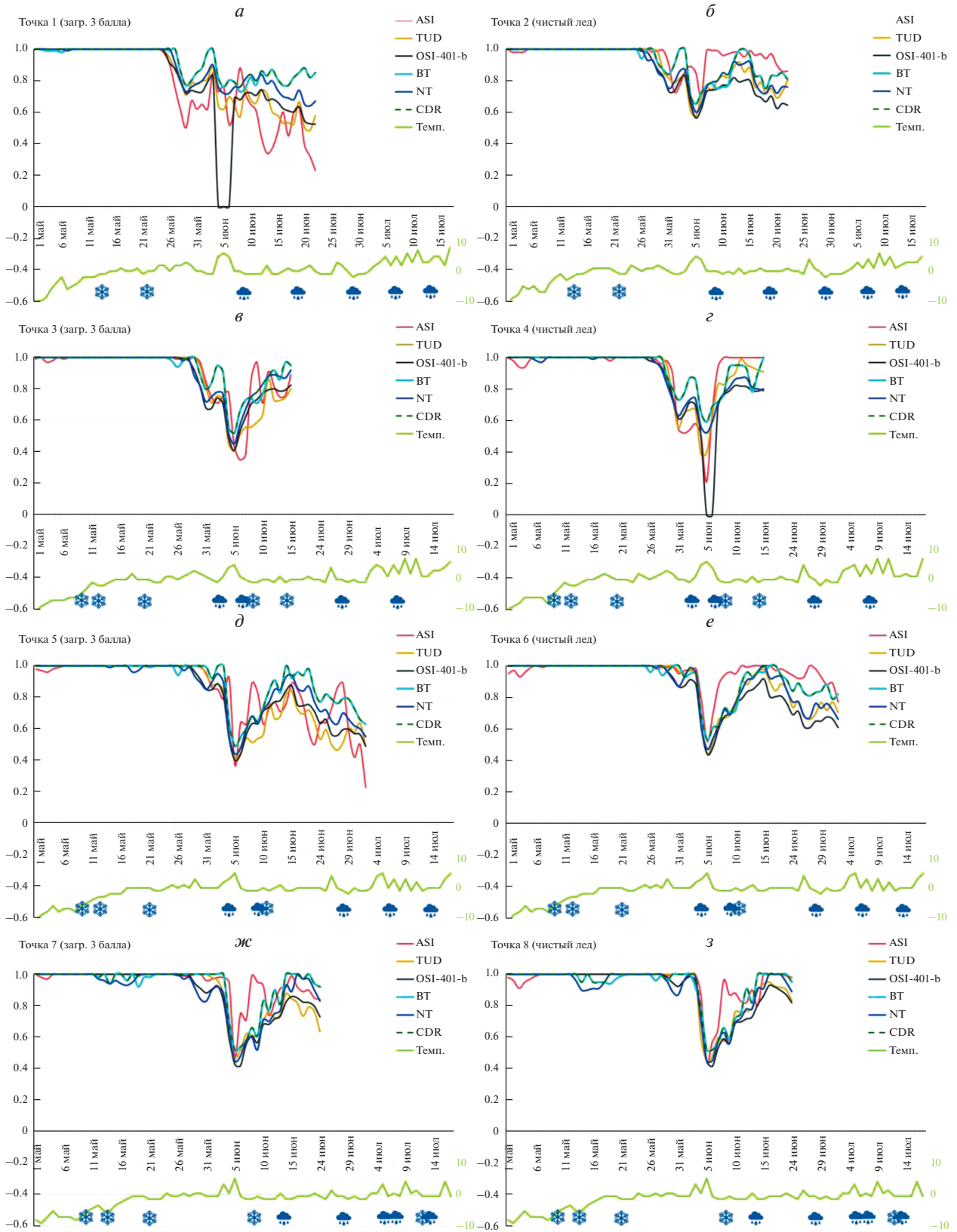


Рис. 9. Графики изменения сплоченности морского льда по данным алгоритмов ASI, TUD, OSI-401-b, BT, NT и CDR в точках 1-8, расположение которых отмечено на рис. 8. В нижней части графика показана температура воздуха на 12 ч каждого дня и выпавшие осадки (снег и дождь).

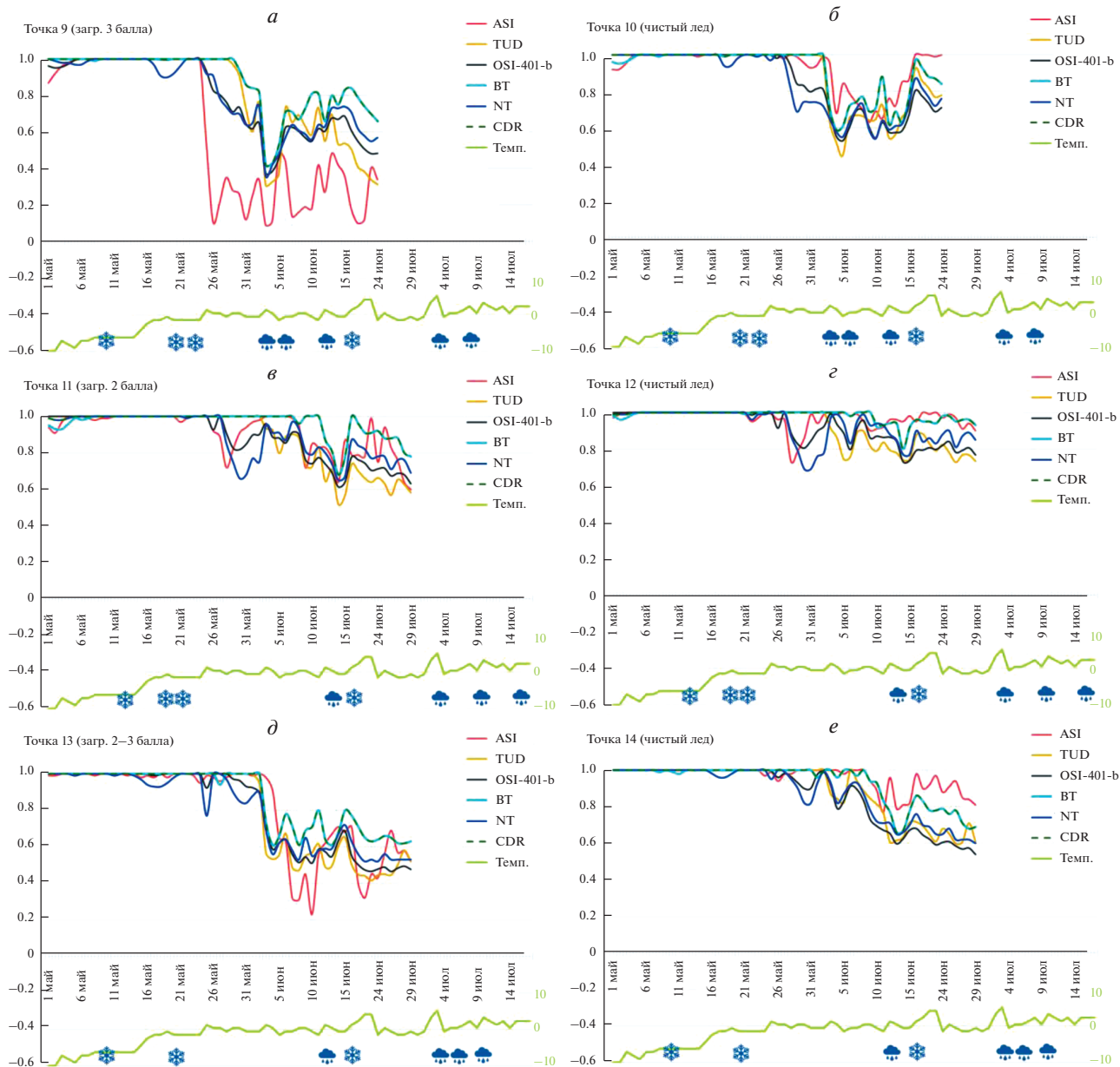


Рис. 10. Графики изменения сплоченности морского льда по данным алгоритмов ASI, TUD, OSI-401-b, BT, NT и CDR в точках 9-14, расположение которых отмечено на рисунке 8. В нижней части графика показана температура воздуха на 12 ч каждого дня и выпавшие осадки (снег и дождь).

льдом. Наиболее сильные отличия от реальной сплоченности льда показывает алгоритм ASI, чуть меньше алгоритм TUD, а минимальная разница с реальной сплоченностью у алгоритмов OSI-401-b, BT, NT и CDR. В точках с максимальной загрязненностью (точки 1, 3, 5, 9 и 13) занижение сплоченности во время таяния наиболее заметно для всех алгоритмов относительно сплоченности в соответствующих точках с чистым льдом. В точках с меньшей загрязненностью (точки 7 и 11) разница не столь заметна. Степень занижения для каждого алгоритма определяется

используемыми спектральными каналами, о чем подробнее будет рассмотрено в описании к рис. 11.

Обращает на себя внимание “необычное поведение” алгоритма OSI-401-b, который 5 июня в точках 1 и 4 показывает сплоченность 0 баллов. В это время в обеих точках наблюдался скачок температуры до $+7^{\circ}\text{C}$, а в точке 4 также выпало большое количество осадков в виде дождя. Сильное повышение температуры привело к обильному таянию снежного покрова и образованию на льду большого количества воды, которое в точке 1

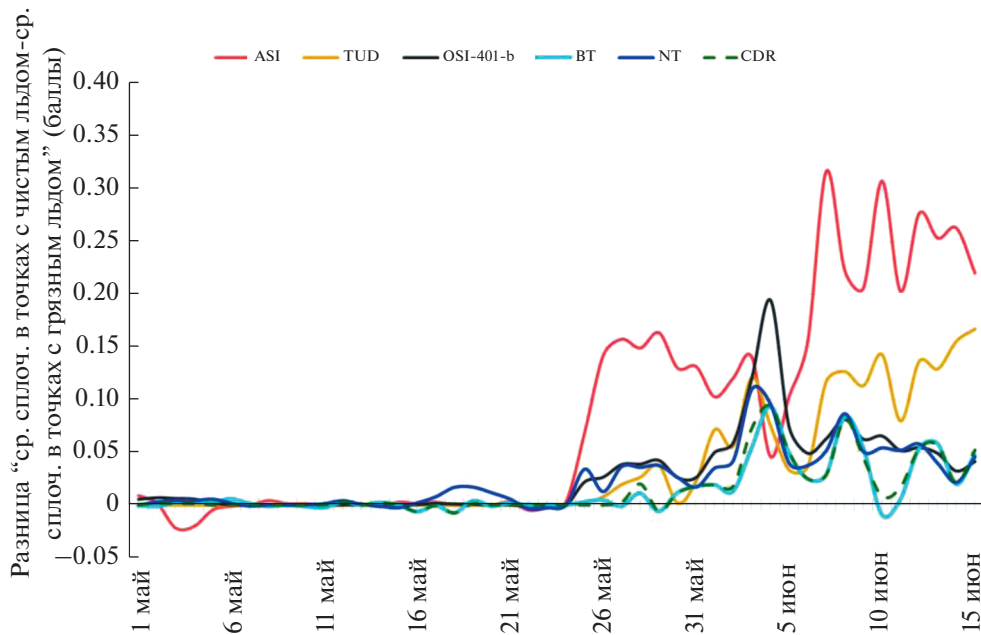


Рис. 11. Разница между средней сплоченностью льда в точках с чистым льдом и в точках с грязным льдом (в баллах), определенной с помощью алгоритмов ASI, TUD, OSI-401-b, BT, NT и CDR по данным спутниковой микроволновой радиометрии.

увеличивалось за счет большего притока тепла из-за наличия загрязнений на льду, а в точке 4 — из-за жидких осадков, выпавших в этот день. Вероятно, такое состояние поверхности ледяного покрова и комбинация каналов, которую использует алгоритм OSI-401-b, привели к значительным ошибкам в определении сплоченности льда. Однако этот вопрос требует дальнейшего осмысления и теоретического анализа, что и планирует выполнить в будущих исследованиях.

Также стоит отметить существенное отличие значений сплоченности, рассчитанных с помощью алгоритма ASI, от значений сплоченности, полученных по другим алгоритмам в точке 9. Лед в этой точке отличается наиболее сильной загрязненностью, что хорошо видно на снимке в видимом диапазоне (рис. 8) — поверхность льда почти черная. Алгоритм ASI существенно сильнее остальных алгоритмов занижает сплоченность грязных льдов.

Разница между отображением сплоченности чистых и загрязненных льдов показана на рис. 11. По графику видно, что все алгоритмы реагируют в период таяния на загрязненность льда, но наиболее чувствителен к загрязненным льдам алгоритм ASI. На втором месте по чувствительности — алгоритм TUD и менее чувствительны к наличию грязи на поверхности льда алгоритмы OSI-401-b, BT, NT и CDR. Объясняется это частотами, которые используются в каждом алгоритме. Алгоритмы ASI и TUD используют высокочастотный канал (85–91 ГГц). Глубина формирования излучения для этого канала для морского льда составляет ве-

личину порядка 1 мм (Тихонов и др., 2020), т.е. излучение, принимаемое радиометром, идет от поверхности, которая является загрязненной и влажной. А алгоритмы OSI-401-b, BT, NT и CDR используют частоты 19 и 37 ГГц. Глубина формирования излучения для морского льда значительно больше и излучает уже не поверхность, а целый слой льда. Однако данное объяснение требует дальнейшего углубленного исследования и экспериментальных измерений в полевых условиях. Также стоит отметить, что не только минимальная чувствительность на загрязненность льдов, но и в целом минимальные ошибки в определении сплоченности в период таяния наблюдаются у алгоритмов BT и CDR.

Таким образом, результаты анализа спутниковой информации показали степень чувствительности алгоритмов ASI, TUD, OSI-401-b, BT, NT и CDR к загрязненности морского льда в период таяния. Проведенные исследования выявили алгоритмы, показывающие наибольшие ошибки в определении сплоченности загрязненных льдов, а также алгоритмы, которые можно использовать для оценки площади, занимаемой подобными льдами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе подробно рассматривается отображение загрязненных льдов на спутниковых снимках в видимом диапазоне и влияние загрязненности на определение сплоченности по данным спутниковой микроволновой радиометрии с помощью

шести алгоритмов ASI, TUD, OSI-401-b, BT, NT и CDR.

Результаты исследования показали, что загрязненность льда хорошо проявляется на спутниковых снимках в видимом диапазоне в определенный период таяния. В исследуемом районе, в Восточно-Сибирском море, это период с конца мая, когда вытаивает снежный покров на поверхности льда, до начала июля, когда происходит разрушение морского льда. Известно, что во время процессов таяния, когда на поверхности льда появляются снежицы (Репина и Тихонов, 2018), происходит существенное занижение сплоченности льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии. Однако, помимо влияния разрушенности в период таяния, мы выделили также дополнительное влияние загрязненности на занижение сплоченности. Путем сравнения значений сплоченности в 7 парах точек с одинаковой разрушенностью, но с разной загрязненностью, было определено, что наиболее чувствителен к загрязненным льдам алгоритм ASI, а на втором месте по чувствительности – алгоритм TUD. Оба алгоритма используют высокочастотный канал 85–91 ГГц. Алгоритмы OSI-401-b, BT, NT и CDR, использующие низкочастотные каналы 19 и 37 ГГц, менее чувствительны к загрязненности. Причины такого явления теоретически понятны (см. выше), однако требуют дальнейшего углубленного изучения и экспериментальных измерений в полевых условиях.

Полученные результаты позволили выделить, с одной стороны, два алгоритма ASI и TUD, к которым нужно относиться с большей осторожностью при их использовании в период таяния в шельфовых морях, где загрязненные льды занимают значительные площади, а с другой стороны, эти два алгоритма можно использовать для разработки методики определения районов с загрязненными льдами.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнялась в рамках темы “Мониторинг” гос. регистрация № 122042500031-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Смоляницкий В.М., Афанасьева Е.В., Раев М.Д., Шарков Е.А. Анализ областей морского льда в Северном Ледовитом океане, неопределяемых алгоритмом ASI по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 6. С. 22–38. <https://doi.org/10.31857/S0205961421060026>

Аппель И.Л., Гудкович З.М. Отражательная способность ледяного покрова в период таяния льда в юго-восточной части моря Лаптевых // Полярная экспедиция “Север-76” (научные результаты). 1979. Ч. 2. С. 27–32.

Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Лукин А.А. Космический мониторинг состояния Северных территорий, нарушенных нефтедобычей // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 6. С. 35–44. <https://doi.org/10.7868/S0205961416060014>

Брызгин Н.Н. К вопросу об альбедо поверхности дрейфующих льдов // Проблемы Арктики и Антарктики. 1959. Вып. 1. С. 33–40.

Иванов Б.В. Оценка естественного и антропогенного загрязнения морского льда // МГИ. 2007. Т. 102. С. 121–126.

Митник М.Л., Митник Л.М. Калибровка и валидация данных микроволнового радиометра AMSR-E спутника Aqua // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 1. С. 244–249.

Репина И.А., Тихонов В.В. Снежицы на поверхности льда в летний период и их связь с климатическими изменениями в Арктике // Российская Арктика. 2018. № 2. С. 15–30. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00015>

Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков 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. С. 65–84.

Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю., Синицкий А.И. Особенности собственного излучения Обской губы в L-диапазоне в период ледостава // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 3. С. 59–76. <https://doi.org/10.31857/s0205961420030070>

Шаратунова М.В., Иванов В.В. Изменчивость возрастного состава льдов Восточно-Сибирского моря в зимний период // Труды II Всероссийской конференции “Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития”. 2018. Санкт-Петербург. С. 692–696.

Юлин А.В., Шаратунова М.В., Павлова Е.А., Иванов В.В. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря // Проблемы Арктики и Антарктики, 2018. № 3. С. 229–240. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240>

Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S., Repina I., Raev M., Sokolova J., Sharkov E., Afanasieva E., Serovetnikov S. Comparison of Arctic Sea Ice Concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 Algorithms with Summer and Winter Ship Data // Remote Sensing. 2019. V. 11. P. 2481. <https://doi.org/10.3390/rs11212481>

Babin M., Arrigo K., Bélanger S., Forget M.-H. IOCCG. Ocean Colour Remote Sensing in Polar Seas. IOCCG Report Series, No. 16, International Ocean Colour Coordinating, Group, Dartmouth, Canada, 2015.

Cavalieri D.J., Gloersen P., Campbell W. J. Determination of sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR // J. Geophysical Research: Atmospheres. 1984. V. 89. P. 5355–5369. <https://doi.org/10.1029/JD089iD04p05355>

Comiso J.C. Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1986. V. 91. P. 975–994. <https://doi.org/10.1029/JC091iC01p00975>

Comiso J.C., Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Gloersen P. Passive microwave algorithms for sea ice concentration: A comparison of two techniques // Remote Sensing of Environment. V. 60. P. 357–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00220-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00220-9)

Comiso J.C., Gersten R.A., Stock L.V., Turner J., Perez G.J., Cho K. Positive Trend in the Antarctic Sea Ice Cover and

- Associated Changes in Surface Temperature // *J. Climate*. 2017. V. 30. P. 2251–2267.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0408.1>
- Emery W., Camps A. Introduction to Satellite Remote Sensing: Atmosphere, Ocean, Land and Cryosphere Application, Elsevier Inc. 2017. 856 p.
- ESA SICCI project consortium. D2.6: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBDv1), ESA Sea Ice Climate Initiative Phase 1 Report SICCI-ATBDv1-04-13, version 1.1, 2013.
- Harasyn M.L., Isleifson D., Barber D.G. The Influence of Surface Sediment Presence on Observed Passive Microwave Brightness Temperatures of First-Year Sea Ice during the Summer Melt Period // *Canadian J. Remote Sensing*. 2019. V. 45. P. 333–349.
<https://doi.org/10.1080/07038992.2019.1625759>
- Ivanova N., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sorensen A., Saldo R., Dybkjær 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 // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 1797–1817.
<https://doi.org/10.5194/tc-9-1797-2015>
- Meier W.N., Windnagel S.S. CDR Climate Algorithm and Theoretical Basis Document: Sea Ice Concentration, Rev 9. NOAA NCEI CDR Program., 2021.
- Pedersen L.T. Chapter 6.2 in Sandven et al. IMSI report no. 8. Development of new satellite ice data products (Chapter 6.2). Bergen, Norway: NERSC Technical Report no.145, Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen, Norway, 1998.
- Reimnitz E., McCormick M., McDougall K., Brouwers, E. Sediment Export by Ice Rafting from a Coastal Polynya, Arctic Alaska, U.S.A // *Arctic and Alpine Research*. 1993. V. 25. P. 83–98.
<https://doi.org/10.2307/1551544>
- Smith D.M. Extraction of winter total sea-ice concentration in the Greenland and Barents Seas from SSM/I data // *International J. Remote Sensing*. 1996. V. 17. P. 2625–2646.
<https://doi.org/10.1080/01431169608949096>
- Smolyanitsky V., Karelin I., Karklin V., Ivanov B. Ice conditions, albedo, surface contamination and ice mass exchange // In Proceedings of the Oceanography of the ESS. Paper presented at ESS Workshop 2003, Malaga, Spain, 11–18 October 2003; International Arctic Research Center: Fairbanks, AK, USA, 2003.
- Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2008. V. 113, C02S03.
<https://doi.org/10.1029/2005JC003384>
- Tian T., Tonboe R., Lavelle J. The EUMETSAT OSI SAF AMSR-2 Sea Ice Concentration Algorithm. Theoretical Basis Document. Product OSI-408. v.1.0. 2015.
- Tonboe R., Lavelle J. OSI SAF Sea Ice Concentration Algorithm Theoretical Basis Document. Product OSI-401-b. v1.5. 2016.
- Ulaby F.T., Long D.G. Microwave radar and radiometric remote sensing., Univ. of Michigan Press. 2014.

The Contribution of Sea Ice Contamination to Inaccuracies in Definition of Sea Ice Concentration Using Satellite Microwave Radiometry Data during the Ice Melt Period

T. A. Alekseeva^{1,2}, J. V. Sokolova^{1,2}, E. V. Afanasyeva^{1,2}, V. V. Tikhonov^{2,3}, M. D. Raev², E. A. Sharkov², S. M. Kovalev¹, and V. M. Smolyanitsky¹

¹Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

²Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Barnaul, Russia

The values of sea ice concentration retrieved from satellite microwave radiometry data are influenced by many natural factors. In this study, sea ice contamination is considered. The values of sea ice concentration obtained using six algorithms: ASI, TUD, OSI-401-b, BT, NT, and CDR, have been analyzed on the example of land-fast ice in the East Siberian Sea. The choice of the algorithms is explained by their open-access distribution and very high popularity among scientific studies. The analysis has revealed that during the active ice melt period, from late May until early July, all the algorithms show lower ice concentrations in contaminated ice compared to clean ice areas. The most sensitive to sea ice contaminants are ASI and TUD. It is explained by the high-frequency channels, 85–91 GHz, used by these two algorithms.

Keywords: Arctic Ocean, satellite microwave radiometry, fast ice, stage of ice melt, ice contamination

REFERENCES

- Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S., Repina I., Raev M., Sokolova J., Sharkov E., Afanasyeva E., Serovetnikov S. Comparison of Arctic Sea Ice Concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 Algorithms with Summer and Winter Ship Data // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. P. 2481.
<https://doi.org/10.3390/rs11212481>
- Alekseeva T.A., Sokolova J.V., Tikhonov V.V., Smolyanitsky V.M., Afanasyeva E.V., Raev M.D., Sharkov E.A. Analiz oblastej morskogo l'da v Severnom Ledovitom okeane, neopredelyaemyh algoritmom ASI po dannym sputnikovoj mikrovolnovoj radiometrii [Analysis of sea ice areas undetectable by satellite microwave radiometry (ASI Algorithm) in the Arctic ocean] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2021. № 6. P. 22–38. (In Russian).
<https://doi.org/10.31857/S0205961421060026>
- Appel' I.L., Gudkovich Z.M. Otrazhatel'naya sposobnost' ledyanogo pokrova v period tayaniya l'da v yugo-vostochnoj chasti morya [Reflection capacity of ice cover during its melting in the south-eastern part of the Laptev Sea] // *Pol-*

- yarnaya ekspeditsiya "Sever-76" (nauchnye rezul'taty. 1979. ch.2, s. 27–32. (In Russian).
- Babin M., Arrigo K., Bélanger S., Forget M.-H.* IOCCG. Ocean Colour Remote Sensing in Polar Seas. IOCCG Report Series, No. 16, International Ocean Colour Coordinating, Group, Dartmouth, Canada, 2015.
- Bondur V.G., Vorobyov V.E., Lukin A.A.* Satellite monitoring of the northern territories disturbed by oil production // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53. № 9. P. 1007–1015.
<https://doi.org/10.1134/S0001433817090067>
- Bryazgin N.N.* K voprosu ob al'bedo poverhnosti dreyfuyushchih l'dov [About the albedo of surface of drifting ice] // *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 1959. V. 1. S. 33–40. (In Russian).
- Cavalieri D.J., Gloersen P., Campbell W.J.* Determination of sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 1984. V. 89. P. 5355–5369.
<https://doi.org/10.1029/JD089iD04p05355>
- Comiso J.C.* Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1986. V. 91. P. 975–994.
<https://doi.org/10.1029/JC091iC01p00975>
- Comiso J.C., Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Gloersen P.* Passive microwave algorithms for sea ice concentration: A comparison of two techniques // *Remote Sensing of Environment*. V. 60. P. 357–384.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00220-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00220-9)
- Comiso J.C., Gersten R.A., Stock L.V., Turner J., Perez G.J., Cho K.* Positive Trend in the Antarctic Sea Ice Cover and Associated Changes in Surface Temperature // *J. Climate*. 2017. V. 30. P. 2251–2267.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0408.1>
- Emery W., Camps A.* Introduction to Satellite Remote Sensing: Atmosphere, Ocean, Land and Cryosphere Application, Elsevier Inc. 2017. 856 p.
- ESA SICCI project consortium. D2.6: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBDv1), ESA Sea Ice Climate Initiative Phase 1 Report SICCI-ATBDv1-04-13, version 1.1, 2013.
- Harasyn M.L., Isleifson D., Barber D.G.* The Influence of Surface Sediment Presence on Observed Passive Microwave Brightness Temperatures of First-Year Sea Ice during the Summer Melt Period // *Canadian J. Remote Sensing*. 2019. V. 45. P. 333–349.
<https://doi.org/10.1080/07038992.2019.1625759>
- Ivanov B.V.* Ocenka estestvennogo i antropogennogo zagryazneniya morskogo l'da [Estimation of natural and anthropogenic dirtiness of sea ice] // *MGI*. 2007. V. 102. P. 121–126. (In Russian)
- Ivanova N., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sørensen A., Saldo R., Dybkjær 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 // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 1797–1817.
<https://doi.org/10.5194/tc-9-1797-2015>
- Meier W.N., Windnagel S.S.* CDR Climate Algorithm and Theoretical Basis Document: Sea Ice Concentration, Rev 9. NOAA NCEI CDR Program., 2021.
- Mitnik M.L., Mitnik L.M.* Kalibrovka i validatsiya dannykh mikrovolnovogo radiometra AMSR-E sputnika Aqua [Calibration and validation of passive microwave radiometer AMSR-E of satellite Aqua] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2005. V. 1. P. 244–249. (In Russian).
- Pedersen L.T.* Chapter 6.2 in Sandven et al. IMSI report no. 8. Development of new satellite ice data products (Chapter 6.2). Bergen, Norway: NERSC Technical Report no. 145, Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen, Norway, 1998.
- Reimnitz E., McCormick M., McDougall K., Brouwers, E.* Sediment Export by Ice Rafting from a Coastal Polynya, Arctic Alaska, U.S.A // *Arctic and Alpine Research*. 1993. V. 25. P. 83–98.
<https://doi.org/10.2307/1551544>
- Repina I.A., Tikhonov V.V.* Snezhnitsy na poverhnosti l'da v letnij period i ih svyaz' s klimaticheskimi izmeneniyami v Arktike [Melt pond on the sea ice surface during summer and its connection with Arctic climate change] / *Russian Arctic*. 2018. № 2. P. 15–30. (In Russian).
<https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00015>
- Sharatunova M.V., Ivanov V.V.* Izmenchivost' vozrastnogo sostava l'dov Vostochno-Sibirskogo morya v zimnij period [Variability of sea ice age in the East-Siberian Sea in winter period] // *Trudy II Vserossijskoj konferentsii "Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya"*. 2018. Saint-Petersburg. P. 692–696.
- Smith D.M.* Extraction of winter total sea-ice concentration in the Greenland and Barents Seas from SSM/I data // *International J. Remote Sensing*. 1996. V. 17. P. 2625–2646.
<https://doi.org/10.1080/01431169608949096>
- Smolyanitsky V., Karelin I., Karklin V., Ivanov B.* Ice conditions, albedo, surface contamination and ice mass exchange // In *Proceedings of the Oceanography of the ESS*. Paper presented at ESSS Workshop 2003, Malaga, Spain, 11–18 October 2003; International Arctic Research Center: Fairbanks, AK, USA, 2003.
- Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2008. V. 113, C02S03.
<https://doi.org/10.1029/2005JC003384>
- Tian T., Tonboe R., Lavelle J.* The EUMETSAT OSI SAF AMSR-2 Sea Ice Concentration Algorithm. Theoretical Basis Document. Product OSI-408. v.1.0. 2015.
- Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Repina I.A., Komarova N. Y.* Satellite microwave radiometry of sea ice of polar regions: a review // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. P. 1012–1030.
<https://doi.org/10.1134/S0001433816090267>
- Tikhonov V.V., Khvostov I.V., Romanov A.N., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N. Yu., Sinititskiy A.I.* L-Band Radiative Features of the Ob Bay in the Freeze-Up Period // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2020. № 3. P. 59–76. (In Russian).
<https://doi.org/10.31857/s0205961420030070>
- Tonboe R., Lavelle J.* OSI SAF Sea Ice Concentration Algorithm Theoretical Basis Document. Product OSI-401-b. v1.5. 2016.
- Ulaby F.T., Long D.G.* Microwave radar and radiometric remote sensing., Univ. of Michigan Press. 2014.
- Yulin A.V., Sharatunova M.V., Pavlova E.A., Ivanov V.V.* Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' ledyanykh massivov Vostochno-Sibirskogo morya [Seasonal and interannual changes of ice massifs in East Siberian sea. Arctic and Antarctic Research] // *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2018. № 3. P. 229–240. (In Russian).
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240>