

УДК 551.467

© *Е. В. Заболотских**, *Е. А. Балашова*

Российский государственный гидрометеорологический университет, 195196, Малоохтинский проспект, д. 98, г. Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: liza@rshu.ru

ДИНАМИКА МОРСКОГО ЛЬДА В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ ЗИМОЙ 2019/2020

Статья поступила в редакцию 09.10.2020, после доработки 22.12.2020

Динамика морского льда в Печорском море зимой 2019/2020 изучалась на основе спутниковых и модельных данных разного пространственного и временного разрешения. При анализе факторов, влияющих на изменения площади и возраста льда, использовались модельные поля температуры воздуха в приземном слое атмосферы, температуры поверхности океана и приводного ветра, а также, поля поверхностных течений, восстановленных по спутниковым данным. При анализе характеристик морского льда использовались спутниковые снимки и измерения высокого (Sentinel-1), умеренного (MODIS) и низкого (AMSR2, SMOS) пространственного разрешения. Визуализация данных проводилась на Арктическом портале, обеспечивающем возможность анализировать спутниковые изображения и поля геофизических параметров разного пространственно-временного разрешения. Верификация анализа возрастного состава льдов проводилась с использованием детальных ледовых карт Арктического и антарктического научно-исследовательского института, а толщины льда — с использованием измерений толщины льда спутниковым радиометром SMOS. Проведенный анализ позволил сделать вывод, что главной причиной нетипично молодого состава льдов к концу зимы и разрушения ледяного покрова на месяц раньше, чем традиционно в мягкие зимы, явились сильные Северо-Атлантические циклоны, сопровождающиеся развитием над Печорским морем штормовых ветров и положительными аномалиями температуры воздуха. Предположительно, увеличение количества Северо-Атлантических циклонов и их интенсивности в результате изменений климата Арктики приведут к более резкому изменению характеристик ледяного покрова Печорского моря (уменьшению площади льда и его толщины), чем в других районах Арктики.

Ключевые слова: морской лёд, Печорское море, спутниковое дистанционное зондирование.

© *E. V. Zabolotskikh**, *E. A. Balashova*

Russian State Hydrometeorological University, 195196, Malookhtinsky pr., 98, St. Petersburg, Russia

*E-mail: liza@rshu.ru

SEA ICE DYNAMICS IN THE PECHORA SEA IN WINTER 2019/2020

Received 09.10.2020, in final form 22.12.2020

The sea ice dynamics in the Pechora Sea in winter 2019/2020 was studied basing on satellite and model data of different spatial and temporal resolution. Model fields of air temperature, sea surface temperature and surface wind as well as the surface current fields retrieved from satellite data were used to analyze the main factors influencing the changes in the sea ice area and types. To derive the sea ice characteristics satellite images and measurements of high (Sentinel-1), moderate (MODIS) and low (AMSR2, SMOS) spatial resolution were used. The Arctic portal ensured the instrumental possibility for data visualization to analyze satellite images and geophysical parameter fields of different spatial and temporal resolutions. The verification of the sea ice type structure analysis was done on the bases of the detailed sea ice maps of the Arctic and Antarctic Research Institute, whereas the verification of the sea ice thickness was done using the SMOS estimates. We conclude that intensive North Atlantic cyclones, accompanied by the development of storm winds over the Pechora Sea and by positive air temperature anomalies, are the main reasons for the atypically young sea ice type structure by the end of the winter and for the destruction of the sea ice cover a month earlier than traditionally in mild winters. Presumably, an increase in the number of the North Atlantic cyclones and in their intensity as a result of the Arctic climate changes will lead to sharper changes in the characteristics of the sea ice cover of the Pechora Sea (stronger decrease in the sea ice area and thickness) than for the other regions of the Arctic.

Key words: sea ice, Pechora Sea, satellite remote sensing.

Ссылка для цитирования: *Заболотских Е.В., Балашова Е.А.* Динамика морского льда в Печорском море зимой 2019/2020 // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.* 2021. Т. 14, № 1. С. 97–105. doi: 10.7868/S207366732101010X

For citation: *Zabolotskikh E.V., Balashova E.A.* Sea Ice Dynamics in the Pechora Sea in Winter 2019/2020. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika.* 2021, 14, 1, 97–105. doi: 10.7868/S207366732101010X

1. Введение

Мезомасштабная динамика морского льда, особенно в прикромочной ледовой зоне (ПЛЗ), является результатом комплексного воздействия на лед множества механизмов — апвеллинга, мезомасштабных вихрей, ветровых и внутренних волн, механического взаимодействия с ледяными образованиями и др. [1]. Мезомасштабные и субмезомасштабные вихревые движения, глубина распространения которых может достигать нескольких десятков и сотен метров, влияют на динамику и термодинамику льда в прикромочной ледовой зоне, способствуя более интенсивному таянию льда летом и мешая установлению устойчивого ледяного покрова зимой за счет переноса льда в более теплые воды приповерхностного слоя атмосферы [2]. Изучение мезомасштабной динамики морского льда, дополненное анализом ее основополагающих причин, таким образом, помогает не только определять параметры океанических явлений, проявляющихся в полях движущегося морского льда [3], но и прогнозировать развитие ледяного покрова окраинных морей [4]. Природно-климатические условия Печорского моря определяются как его высокоширотным положением, так и отепляющим влиянием Северной Атлантики и воздушных масс, поступающих из умеренных широт. Печорское море относится к окраинным морям Полярного бассейна, где наблюдаются сложная динамика вод, восходящие и нисходящие потоки вод и фронтальные зоны, образующиеся в результате смешения речных вод и морских вод атлантического и арктического происхождения. Метеорологический режим моря формируется главным образом под влиянием сезонных особенностей атмосферной циркуляции, заключающихся, в частности, в активизации циклонической деятельности в осенне-зимний период, приводящей к преобладанию западного переноса воздушных масс над Печорским морем. В переднем секторе циклонов на Печорское море выносятся теплые и влажные воздушные массы [5]. Основными факторами, определяющими ледовый режим Печорского моря, являются атмосферные процессы в осенне-зимний период, морфометрические условия береговой зоны и ледообмен с окружающими морями [6]. Замерзание акватории моря происходит при отсутствии остаточных льдов. Традиционно ледообразование начинается в восточной, юго-восточной — наиболее мелководной и распресненной части, а затем распространяется в западном и северо-западном направлении. Ледяной покров состоит из однолетних льдов различной толщины, включая толстые льды (120–200 см). Припай устанавливается ежегодно вдоль большинства материковых и островных берегов Печорского моря. Максимального развития припай достигает в апреле. Таяние льда в среднем начинается в третьей декаде мая. Очищение ото льдов западной части моря в среднем начинается в первой половине мая. Окончательное очищение восточной части Печорского моря обычно происходит в начале июля. Детальная характеристика пространственно-временной изменчивости ледовых условий и состояния ледяного покрова в Печорском море дана в монографии [7]. Средние характеристики состояния ледяного покрова моря в последние десятилетия в зависимости от суровости зимних условий приведены в актуальном отчете [5]. По данным отчета в XXI в. в Печорском море отсутствовали суровые зимы, 25 % зим были мягкими, а 65 % — умеренными. Среднегодовая площадь ледяного покрова моря за период 2003–2019 гг. уменьшалась со скоростью 132 км²/год. Минимальная ледовитость моря наблюдалась в 2008, 2012 и 2017 гг. Погодные условия зимы 2019/2020 гг. в Печорском море привели к тому, что к концу зимы в море не сформировалось льда толще молодого (серого и серо-белого) (в соответствии с номенклатурой морских льдов [8]). Целью данной работы является анализ мезомасштабной динамики морского льда и погодных условий прошедшей зимой в Печорском море на основе спутниковых и модельных данных, позволяющий выявить и обобщить причины нетрадиционного возрастного состава морских льдов, сформировавшихся к концу мая 2020 г.

2. Спутниковые данные для изучения динамики ледяного покрова

Использование данных спутникового дистанционного зондирования является основным методом изучения морских льдов, поскольку только спутниковые данные позволяют получать пространственное распределение характеристик морского льда [1]. Для мониторинга морского льда используются спутниковые измерения в различных диапазонах электромагнитного спектра, однако возможности использования оптического диапазона в Арктике ограничены из-за полярной ночи и редко наблюдающейся ясной погоде. Тем не менее, при благоприятных погодных условиях и достаточной освещенности оптические снимки позволяют получать высокодетальные изображения ледяного покрова [9]. Однако основными инструментами изучения ледяного покрова арктических морей являются микроволновые активные и пассивные измерительные приборы — радиолокаторы, скаттерометры и радиометры [1]. Интерпретация микроволновых измерений возможна в любое время суток практически независимо от облачности [10]. Измерения ради-

олокаторами удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) позволяют разделять лед и воду и классифицировать лед по возрастному составу [11]. На снимках радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) отчетливо проявляются особенности ледяных полей, торосистые образования и трещины [12]. Высокое пространственное разрешение РСА используется для построения карт морского льда с его детальной классификацией [13] и позволяет изучать динамику и изменчивость морского льда, особенности его трансформации, дрейфа, замерзания и таяния. Европейское Космическое Агентство (ESA) предоставляет свободный доступ к данным двух европейских спутников с РСА аппаратурой — Sentinel-1A и Sentinel-1B. И несмотря на то, что эти данные не могут рассматриваться как регулярные данные наблюдений, покрытие Печорского моря составляет в среднем 5–6 снимков в неделю.

Измерения спутниковых микроволновых радиометров характеризуются низким пространственным разрешением (десятки квадратных км), однако с их помощью возможен регулярный мониторинг сплоченности морского льда. Особый интерес представляют методы, использующие измерения вблизи 90 ГГц, поскольку эти методы позволяют строить карты с разрешением несколько км. С использованием измерений японского микроволнового радиометра Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) может быть достигнуто разрешение 3 км [14].

Восстановление толщины морского льда по данным измерений радиометра Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) с помощью эмпирического алгоритма основано на способности радиоволн проникать в морской лед толщиной не более 50 см. Точность алгоритма низкая, и он не применим в условиях таяния льда и для оценки толщины льдов, больше 50 см. Тем не менее, в условиях устойчивых отрицательных температур воздуха данные SMOS могут быть использованы для оценки динамики толщины тонких льдов [15].

3. Исходные данные для анализа

В данной работе анализировались спутниковые данные за полугодовой период 01.12.2019–31.05.2020 г. Использовались данные РСА Sentinel-1, работающего в С-диапазоне, полученные преимущественно на ГГ поляризации (горизонтально поляризованный падающий и отраженный сигналы) с пространственным разрешением 40×40 м, а также в качестве дополнительного источника информации, карты сплоченности морского льда с пространственным разрешением 3×3 км, построенные по данным AMSR2 уровня Level 1R при помощи алгоритма [16]. Несмотря на низкое разрешение, при отсутствии снимков Sentinel-1, или в условиях сильного ветра, когда интерпретация радиолокационных изображений затруднена, карты сплоченности льда не только дают возможность отслеживать динамику ледяных полей, трещин и полыней, но и однозначно позволяют определять тип поверхности (лед или вода). Начиная с конца февраля, дополнительно анализировались оптические снимки спектрального радиометра MODIS — в тех случаях, когда облачность позволяла «увидеть» поверхность. Для дней с интенсивной динамикой ледяного покрова анализировались модельные поля температуры океана (усредненные за неделю данные NOAA Optimum Interpolation (OI) Sea Surface Temperature (SST) V2 на сетке $1 \times 1^\circ$ [17]), приводного ветра (ежедневные данные NCEP GFS на сетке $0.25 \times 0.25^\circ$ [18]) и карты поверхностных течений OSCAR Surface Currents на сетке $\sim 0.33 \times 0.33^\circ$, представляющие собой усредненные за 5 дней данные по результирующим скоростям течений в 30 м верхнем слое океана [19]. Карты морского льда строились специалистами Лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ. Для верификации анализа изменений возрастного состава льдов в Печорском море в течение зимы использовались детальные карты Арктического и антарктического научно-исследовательского института (<http://wdc.aari.ru/datasets/d0004/bar>, дата обращения: 20.06.2020) и поля толщины льда по данным спутникового радиометра SMOS с пространственным разрешением 40×40 км, построенные по оперативным данным университета Бремена (https://seaice.uni-bremen.de/data/smos_smap, дата обращения: 01.08.2020). Для отображения в ГИС-системе (на Арктическом портале) для каждого из перечисленных типов данных были написаны программы-обработчики, позволяющие загружать, индексировать, перепроецировать данные и генерировать систему разномасштабных изображений.

4. Полученные результаты

Ледяной покров в Печорском море зимой 2019/2020 гг. начал формироваться в третьей декаде октября в виде ниласовых льдов в районе Печорской губы. К декабрю 2019 г. в Печорском море установился типичный для данного времени года ледяной покров с припаем в Печорской, Хайпудырской, Паханческой и Кузнецкой губах толщиной не более 50 см. Несмотря на положительные аномалии температуры воздуха во второй половине октября и в начале ноября, уже в первой декаде ноября положение границы дрейфующих

льдов проходило по линии Гуляевские Кошки-северная оконечность о-ва Долгий—о. Вайгач. В дальнейшем формирование льда продолжилось в условиях отрицательных температур воздуха в приземном слое атмосферы (T_a) и близких к нулю температур поверхности океана (ТПО). Преобладающие отжимные ветры преимущественно юго-западного направления во второй половине ноября, относящиеся образующиеся молодые и ниласовые формы льда в более теплые воды Баренцева моря, способствовали формированию к 1 декабря широкой полыни вдоль берега с максимальной шириной ~ 30 км и протяженностью ~ 200 км, заполненной частично ниласом, частично — ледяным салом (рис. 1, *a*; зона А; см. вклейку). Центральную часть моря занимали, в основном, различной степени битости серые льды толщиной до 10–15 см разной сплоченности. На рис. 1 к юго-западу от о. Долгий можно выделить большое поле сплоченного ровного льда с большей толщиной, о чем свидетельствуют как наблюдаемые трещины (рис. 1, *a*; зона В), так и гряды торосов (рис. 1, *a*; зоны Г), образовавшиеся в результате сжатия льдов под длительным воздействием южного ветра в полыне А [20]. Нилас и серый лед выстраивались в узкие полосы вдоль направления ветра (рис. 1, *a*; зоны Б). Сильный отжимной ветер (до 13 м/с), сменившийся за несколько первых дней декабря направление с южного до юго-западного, способствовал как размывтию прикромочной ледовой зоны, так и выносу молодого льда в более теплые воды (рис. 1, *б*).

В последующие 3 недели над Печорским морем дули ветры преимущественно южного и юго-западного направления. Лишь 2 дня из 20 над территорией наблюдались ветры северного направления, прижимающие льды к берегу. В результате, несмотря на понижение температуры воздуха в целом над областью почти на 10 °С, вынос молодых льдов в более теплые воды (рис. 2, *б*; см. вклейку) не позволил сформироваться областям тонкого однолетнего льда (однолетний лед толщиной 30–70 см, следующая за серо-белым льдом возрастная градация морского льда). Граница льда на севере моря продвинулась на север и северо-запад, но возрастной состав льдов остался прежним с преобладанием ниласа и молодых льдов (рис. 2, *a*). Устойчивый ветер южных и юго-западных направлений способствовал формированию в западной части моря результирующих течений со скоростью $V > 0.1$ м/с, выносящих молодые льды в район с ТПО > 0 °С (рис. 2, *б*). По-прежнему на снимке РСА (рис. 2, *a*) наблюдаются поля серого льда и ниласа в виде выстроившихся по ветру полос (зона Б), площадь припая у берегов материка осталась неизменной, так же, как и площадь стационарной полыни (зона А). На 30 % уменьшилась площадь льда в Хайпудырской губе за счет дрейфа льда в северном и северо-западном направлении. Ледяное поле В на рис. 2, *a* содержит едва заметные трещины, толщина льда не превышает 20–30 см.

Следующие несколько дней декабря 2019 г. характеризовались сменой направления ветра на северное и прекращением выноса морского льда в область более теплых вод. К 25–26.12.2019 температура воздуха над всей территорией Печорского моря опустилась ниже -20 °С. Это привело к интенсивному нарастанию толщины льда и увеличению его площади. Заполнились полыни (рис. 3, *a*). Толщина льда в центральной части моря превысила 30–40 см. Однако приход мощного атлантического циклона с запада за несколько считанных последних дней декабря повысил температуру атмосферы на 10–15 °С (рис. 4, см. вклейку). Скорость восточного ветра достигла 25–30 м/с. Скорость результирующих течений (постоянного Колгуево-Печорского, приливного и дрейфового) с запада в северной части моря достигла 20 см/с. Несмотря на то, что данные по ТПО и T_a в Печорском море демонстрируют значения, не предполагающие таяния льдов ($T_a \sim -7$ — -3 °С, ТПО ~ -1 — 0 °С), анализ ледяного покрова моря 01.01.2020 г. позволяет предположить, что результирующие течения и подъем вод за счет действия сильного ветра привели к увеличению температуры воды в Печорском море, что привело к интенсивному таянию сформировавшегося ледяного покрова, изменению возраста льда на более молодой и формированию резкой кромки на границе ледяного покрова моря с практически 100 %-ной сплоченностью (рис. 3, *б*). Сильный ветер над тонкими молодыми льдами толщиной до 10–15 см, приводит как к их раздробливанию и формированию пластин льда с приподнятыми краями — т. н. блинчатого льда, проявляющегося в повышении σ_0 до величин, характерных для многолетнего льда в центральной части Арктики, так и к деформации льда, обусловленной наложением льдин друг на друга. Эффект повышенной яркости областей деформированного молодого льда в окраинных морях Арктики при определенных ветровых условиях обсуждается, например, в [21].

На рис. 3, *б* огромная область моря на северо-западе занята блинчатым и сильно деформированным льдами. Наличие данных форм льда однозначно свидетельствует об уменьшении толщины ледяного покрова.

Устойчивые отрицательные температуры января и отсутствие циклонов из Северной Атлантики привели к сезонному росту толщины льда в море и типичной трансформации возраста льда, приведшей к установлению к концу января — началу февраля традиционного для данного сезона ледяного покрова, состоящего из тонких и средних однолетних и молодых льдов (рис. 6, *a*). Снимок РСА Sentinel-1 за 04.02.2020 г. свидетельствует о формировании однолетнего льда средней толщины (70–120 см) в западной части моря

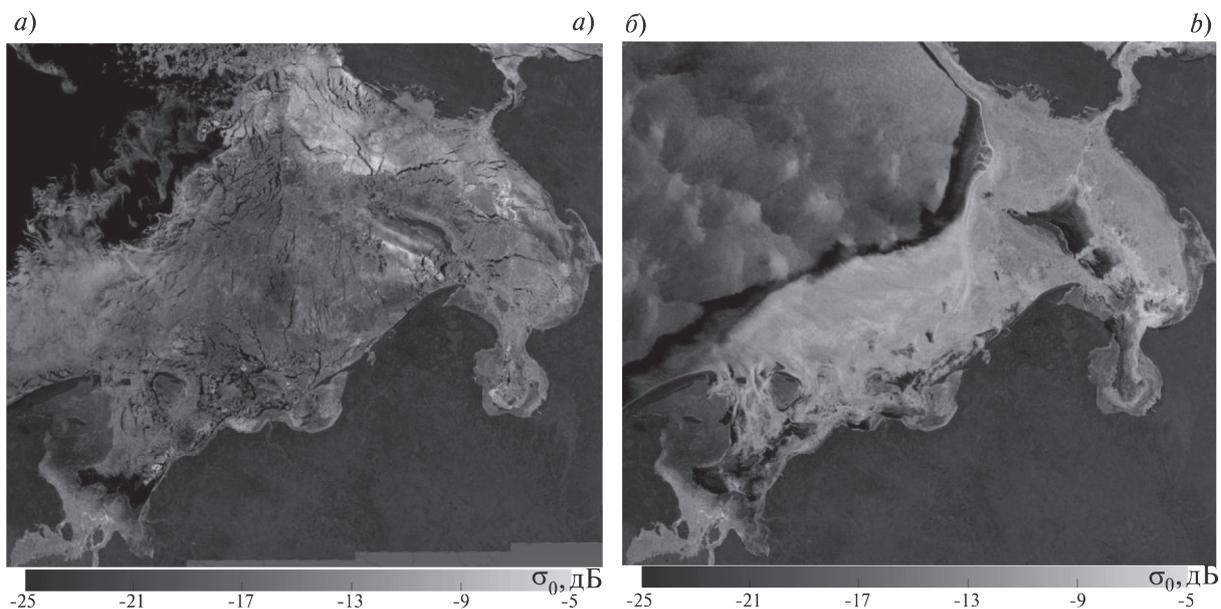


Рис. 3. σ_0 по данным PCA Sentinel-1 на ГГ поляризации: *a* — 26 декабря 2019 г. 02:51 Гр.; *б* — 1 января 2020 02:52 Гр.

Fig. 3. σ_0 measured by Sentinel-1 at HH polarization: *a* — on December 26, 2019 at 02:51 UTC; *b* — on January 1, 2020 at 02:52 UTC.

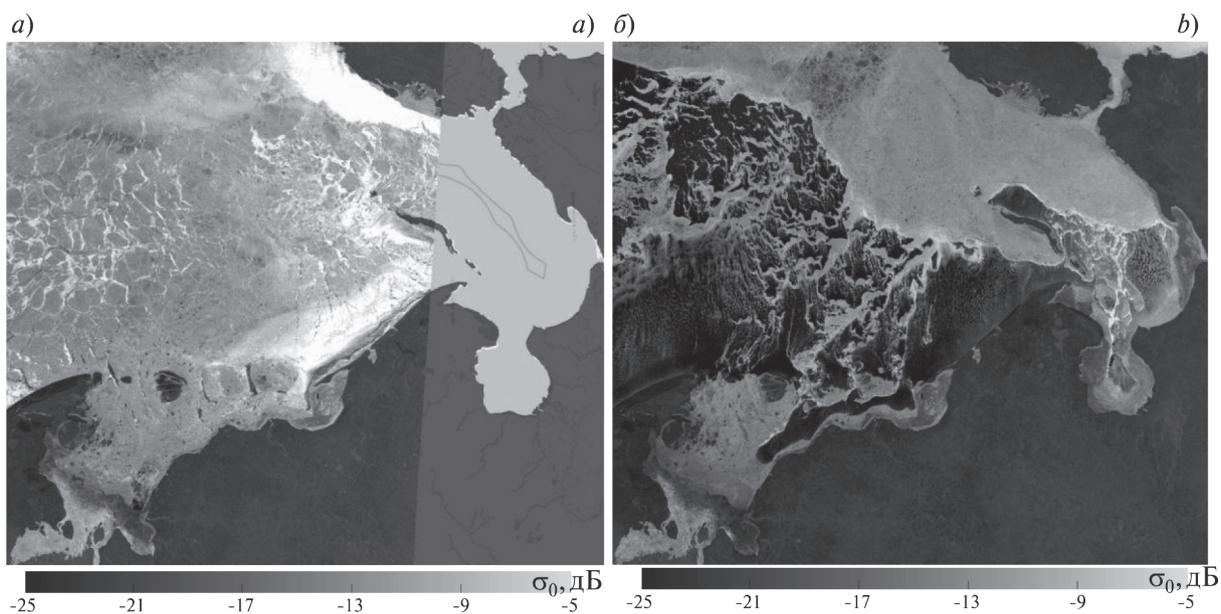


Рис. 5. σ_0 по данным PCA Sentinel-1A на ГГ поляризации: *a* — 4 февраля 2020 г. 03:08 Гр.; *б* — 18 февраля 2020 02:52 Гр.

Fig. 5. σ_0 measured by Sentinel-1A at HH polarization: *a* — February 4, 2020 at 03:08 UTC; *b* — February 18, 2020 at 02:52 UTC.

и тонкого однолетнего льда (30–70 см) в центральной части (рис. 5, *a*). Однако очередной приход теплых воздушных масс 12–14.02.2020 привел к повторению гидрометеорологических условий декабря, в результате которых произошел вынос льда в теплые воды Баренцева моря и его вытаявание (рис. 5, *б*). Измерения толщины льда радиометром SMOS (не представлены) и карты возраста и форм льда (рис. 6, см. вклейку), построенные специалистами Лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ в национальной российской символике по заказу ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-ПРИРАЗЛОМНОЕ» для оперативного ледового обеспечения работы платформы «Приразломная», подтверждают изменение возрастного состава льдов и уменьшение их площади, наблюдаемые на радиолокационных снимках.

18–19.02.2020 г. под влиянием мощного атлантического циклона над морем установилась положительная температура воздуха. Скорость ветра, уносящего дрейфующий лед в области с положительными значениями ТПО, достигла 20–25 м/с. Это привело к окончательному освобождению моря ото льда, за исключением областей припая и тонкого однолетнего льда в северо-восточной части моря. По сути, ледообразование в начале марта началось с типичных условий конца ноября. Дальнейший ледостав в марте не подвергался сильному воздействию циклонов, однако проходил уже на фоне небольших отрицательных температур воздуха, характерных для этого времени года. Это привело к тому, что, за исключением припайных льдов, льды в Печорском море не успели к концу зимы нарастить толщину, превышающую 30–40 см. Исключение составляет северо-восточная часть моря (к востоку и северо-востоку от о. Долгий до о. Вайгач, пролива Югорский Шар и Бельковской губы), толщина ледяных полей которой превысила 70 см. За апрель растаяли льды всех стадий развития, кроме припайных и упомянутой области, а ветер устойчивого восточного направления в последние дни апреля способствовал выносу оставшихся дрейфующих льдов в западную, более теплую часть моря. В начале мая началось разрушение припая и к концу мая в море остался лишь остаточный лед в виде припая в северной части Печорской губы, в Бельковской губе и у юго-западного побережья о. Вайгач. Эти наблюдения основаны на ежедневном анализе как снимков PCA Sentinel-1 A/B, так и, в случае их отсутствия, полей сплоченности льда по данным AMSR2 и оптических изображений MODIS.

График динамики общей площади льда (S1) и площади распространения льда (S2 — площадь льда любой сплоченности) в Печорском море за период с 01.12.2019 г. по конец 05.2020 г. представлен на рис. 7. Среднесуточные значения S1 и S2 рассчитаны с использованием данных по сплоченности льда, восстановленной по методу [16].

Рис. 7 иллюстрирует фазы нарастания и уменьшения площади ледяного покрова в Печорском море, обусловленные влиянием северо-атлантических циклонов. Максимальной площади льда достигли к концу первой декады февраля (S1 ~76 тыс. км²). Из рисунка видно также, что максимальная сплоченность льда (минимальная разница между S1 и S2) наблюдалась в процессе его нарастания в конце января.

4. Заключение

В работе выполнен анализ мезомасштабной динамики характеристик морского льда в Печорском море зимой 2019/2020 гг. и влияющих на нее факторов на основе спутниковых и модельных данных разного пространственно-временного разрешения. Среди основных, определяющих динамику льда факторов рассмотрены метеорологические (температура атмосферы и ветер) и гидрологические (температура океана и течения). Используемые при анализе влияющие на динамику льда параметры обладают конечной точностью (как восстановленные по данным спутниковых измерений, так и модельные). Так, выделить из имеющихся данных по течениям отдельно влияние приливных, термохалинных и дрейфовых не представляется возможным. Тем не менее, характер изменений возрастного состава льда и его площади позволяет заключить, что характеристики ледяного покрова Печорского моря зависят, в первую очередь, от сезонных особенностей крупномасштабной атмосферной циркуляции.

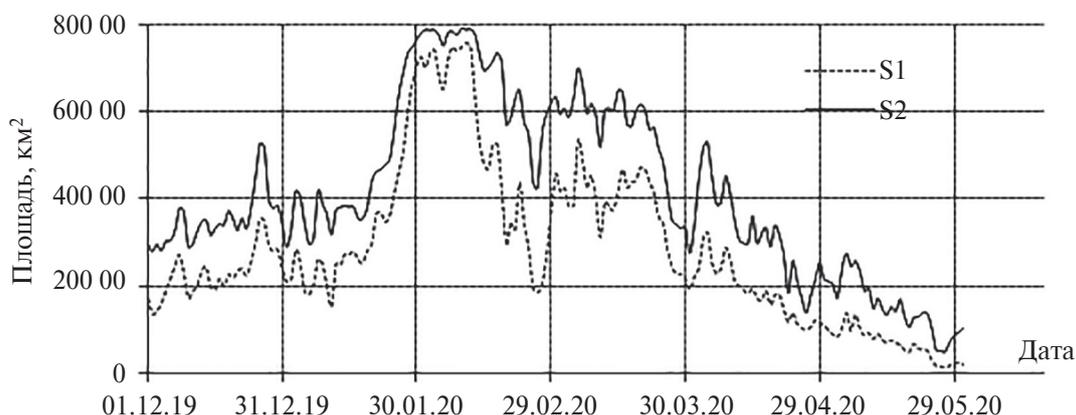


Рис. 7. Динамика общей площади льда (S1) и площади распространения льда (S2) в Печорском море за период с 01.12.2019 г. по конец 05.2020 г.

Fig. 7. Sea ice area (S1) and sea ice extent (S2) dynamics for the Pechora Sea for the period of December 1, 2019—the end of May, 2020.

Атмосферные процессы над Печорским морем зимой 2019/2020 гг. развивались на фоне аномально повышенной повторяемости процессов западной формы циркуляции. При этом циклоны в системе исландского минимума смещались по высокоширотным траекториям и оказывали существенное влияние на полярный район в целом [22].

Активизация циклонической деятельности в осенне-зимний период [5, 23] приводит к выносу теплых воздушных масс на Печорское море и возникновению штормовых ветров, перемешивающих верхние слои океана и способствующих таянию льдов, уменьшению их площади и изменению возрастного состава на более молодой. Календарной зимой 2019/2020 (в декабре, январе и феврале) на Печорское море вышли несколько мощных циклонов, сопровождающихся положительными аномалиями температуры воздуха и сильными ветрами, после прохождения каждого из которых наблюдалось сокращение площади ледяного покрова более чем на 50 % и уменьшение его толщины. Это привело к тому, что к началу мая в море не осталось льда, за исключением припая и тонкого однолетнего льда в северо-восточной части моря, в то время как в среднем таяние льда в море только начинается в третьей декаде мая [5]. Можно предположить, что наблюдающиеся в последние десятилетия изменения климата Арктики, одним из последствий которых является увеличение количества Северо-Атлантических циклонов и их интенсивности [24], приведут к более резкому изменению характеристик ледяного покрова Печорского моря (уменьшению площади льда и его толщины), чем в других районах Арктики.

5. Финансирование

Анализ динамики морского льда был выполнен при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19–17–00236. Закачка, обработка и создание изображений спутниковых и модельных данных на Арктическом портале проводилась в рамках госзадания по теме № 0763–2020–0005.

Литература

1. Johannessen O.M., Bobylev L.P., Shalina E.V., Sandven S. (eds.) Sea ice in the Arctic: Past, Present and Future. Springer, 2020. 579 p.
2. Manucharyan G.E., Thompson A.F. Submesoscale sea ice-ocean interactions in marginal ice zones // J. Geophys. Res. Oceans. 2017. V. 122, N 12. P. 9455–9475.
3. Kozlov I.E., Plotnikov E.V., Manucharyan G.E. Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations // The Cryosphere. 2020. V. 14, N 9. P. 2941–2947.
4. Смирнов В.Г. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей. Санкт-Петербург, 2011. 240 с.
5. Рябенко С.В., Драчкова Д.Н., Евдокимова И.О., Зарубина Л.А., Попкова С.В. Тематический отчет № 2 по ледовым условиям Печорского моря. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, 2020. 40 с.
6. Романкевич Е.А., Лисицин А.П., Виноградов М.Е. Печорское море. Системные исследования (гидрофизика, гидрология, оптика, биология, химия, геология, экология, социоэкономические проблемы). Москва: Изд-во Море, 2003. 486 с.
7. Данилов А.И., Миронов Е.У., Спичкин В.А. Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей // Санкт-Петербург: ААНИИ, 2004. 430 p.
8. Номенклатура ВМО по морскому льду. Терминология — Том I. № 259 WMO/ОММ/ВМО Издание 1970–2017.
9. Смирнов В.Г., Бушуев А.В., Захваткина Н.Ю., Лоцилов В.С. Спутниковый мониторинг морских льдов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. Т. 85, № 2. С. 62–76.
10. Carsey F.D. Microwave Remote Sensing of Sea Ice (Geophysical Monograph 68). Washington D.C.: American Geophysical Union, 1992. 462 p.
11. Rivas M.B., Verspeek J., Verhoef A., Stoffelen A. Bayesian Sea Ice Detection with the Advanced Scatterometer ASCAT // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. V. 50, N 7. P. 2649–2657.
12. Ressel R., Frost A., Lehner S. A Neural Network-Based Classification for Sea Ice Types on X-Band SAR Images // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2015. V. 8, N 7. P. 3672–3680.
13. Dierking W. Sea ice classification on different spatial scales for operational and scientific use // ESA SP; 722. Edinburgh, UK, 2013. doi: 10013/epic.44280
14. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E89-GHz channels // J. Geophys. Res. Oceans 1978–2012. 2008. V. 113, N C2. doi: 10.1029/2005JC003384
15. Huntemann M., Heygster G., Kaleschke L., Krumpfen T., Mäkynen M., Drusch M. Empirical sea ice thickness retrieval during the freeze up period from SMOS high incident angle observations // The Cryosphere. 2014. V. 8, N 2. P. 439–451.

16. Заболотских Е.В., Балашова Е.А., Шапрон Б. Усовершенствованный метод восстановления сплочённости морского льда по данным спутниковых микроволновых измерений вблизи 90 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 4. С. 233–243. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-233-243
17. Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate // J. Clim. 2002. V. 15, N 13. P. 1609–1625.
18. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. 2015, updated daily. NCEP GFS0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.
19. Dohan K. Ocean surface currents from satellite data // J. Geophys. Res. Oceans. 2017. V. 122, N 4. P. 2647–2651.
20. Павлов В.А., Корнишин К.А., Ефимов Я.О., Миронов Е.У., Гузенко Р.Б., Харитонов В.В. Особенности развития консолидированного слоя гряд торосов в морях Карском и Лаптевых // Нефтяное Хозяйство. 2016. № 11. С. 49–54.
21. Rivas B.M., Otsuka I., Stoffelen A., Verhoef A. A scatterometer record of sea ice extents and backscatter: 1992–2016 // The Cryosphere. 2018. V. 12, N9. P. 2941–2953.
22. Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. I квартал 2020. ГИЦ РФ ААНИИ, 2020. С. 57.
23. Васильева П.В., Заболотских Е.В., Шапрон Б. Сравнительный анализ характеристик внетропических циклонов в северной Атлантике и северной части Тихого океана по данным (реанализа ERA-Interim и спутникового радиометра AMSR-E // Современные Проблемы Дистанционного Зондирования Земли Из Космоса. 2018. Т. 15, № 4. С. 236–248.
24. Vihma T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: A review // Surv. Geophys. 2014. V. 35. N 5. P. 1175–1214.

References

1. Johannessen O.M., Bobylev L.P., Shalina E.V., Sandven S. (eds.) Sea ice in the Arctic: past, present and future. Springer, 2020. 579 p.
2. Manucharyan G.E., Thompson A.F. Submesoscale Sea ice-ocean interactions in marginal ice zones. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017, 122, 12, 9455–9475.
3. Kozlov I.E., Plotnikov E.V., Manucharyan G.E. Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations. *The Cryosphere*. 2020, 14, 9, 2941–2947.
4. Smirnov V.G. Satellite methods of sea ice characteristic determination. 2011. 240 p. (in Russian).
5. Ryabchenko S.V., Drachkova D.N., Evdokimova I.O., Zarubina L.A., Popkova S.V. Thematic report No. 2 on ice conditions of the Pechora Sea. Arkhangelsk: Severny (Arktichesky) federalny universitet im. M.V. Lomonosov, 2020. 40 p.
6. Romankevich E.A., Lisitsin A.P., Vinogradov M.E. Pechora Sea. Systems research (hydrophysics, hydrology, optics, biology, chemistry, geology, ecology, socioeconomic problems). Moskva: Izdatelstvo More, 2003. 486 p. (in Russian).
7. Danilov A.I., Mironov E.U., Spichkin V.A. Variability of environmental conditions in the shelf zone of the Barents and Kara Seas. St. Petersburg: AARI, 2004. 430 p. (in Russian).
8. WMO Sea Ice Nomenclature — Terminology — Volume I.N.259 WMO/OMM/BMO Edition 1970–2017. (in Russian).
9. Smirnov V.G., Bushuev A.V., Zakhvatkina N. Yu., Loshchilov V.S. Satellite monitoring of sea ice. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2010, 85, 2, 62–76 (in Russian).
10. Carsey F.D. Microwave Remote Sensing of Sea Ice (Geophysical Monograph 68). Washington D.C.: American Geophysical Union, 1992. 462 p.
11. Rivas M.B., Verspeek J., Verhoef A., Stoffelen A. Bayesian Sea ice detection with the Advanced Scatterometer ASCAT. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2012, 50, 7, 2649–2657.
12. Ressel R., Frost A., Lehner S. A neural network-based classification for sea ice types on X-band SAR images. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2015, 8, 7, 3672–3680.
13. Dierking W. Sea ice classification on different spatial scales for operational and scientific use. *ESA SP; 722. Edinburgh, UK*, 2013. doi: 10013/epic.44280
14. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E89-GHz channels. *J. Geophys. Res. Oceans* 1978–2012. 2008, 113, C2, doi: 10.1029/2005JC003384
15. Huntemann M., Heygster G., Kaleschke L., Krumpfen T., Mäkynen M., Drusch M. Empirical sea ice thickness retrieval during the freeze up period from SMOS high incident angle observations. *The Cryosphere*. 2014, 8, 2, 439–451.
16. Zabolotskikh E.V., Balashova E.A., Chapron B. Advanced method for sea ice concentration retrieval from satellite microwave radiometer measurements at frequencies near 90 GHz. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2019, 16, 4, 233–243. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-233-243 (in Russian).

17. Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Clim.* 2002, 15, 13, 1609–1625.
18. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. 2015, updated daily. NCEP GFS0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.
19. Dohan K. Ocean surface currents from satellite data. *J. Geophys. Res. Oceans.* 2017, 122, 4, 2647–2651.
20. Pavlov V.A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O., Mironov E.U., Guzenko R.B., Kharitonov V.V. Peculiarities of consolidated layer growth of the Kara and Laptev Sea ice ridges. *Neftyanoye Khozyaystvo.* 2016, 11, 49–54 (in Russian).
21. Rivas B.M., Otosaka I., Stoffelen A., Verhoef A. A scatterometer record of sea ice extents and backscatter: 1992–2016. *The Cryosphere.* 2018, 12, 9, 2941–2953.
22. Review of hydrometeorological processes in the Arctic Ocean. I quarter 2020. SRC RF AARI, 2020. 57 p. (in Russian).
23. Vasilyeva P.V., Zabolotskikh E.V., Chapron B. Comparative analysis of the North Atlantic and the North Pacific extratropical cyclone characteristics retrieved from ERA-Interim reanalysis and AMSR-E data. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa.* 2018, 15, 4, 236–248 (in Russian).
24. Vihma T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: A review. *Surv. Geophys.* 2014, 35, 5, 1175–1214.

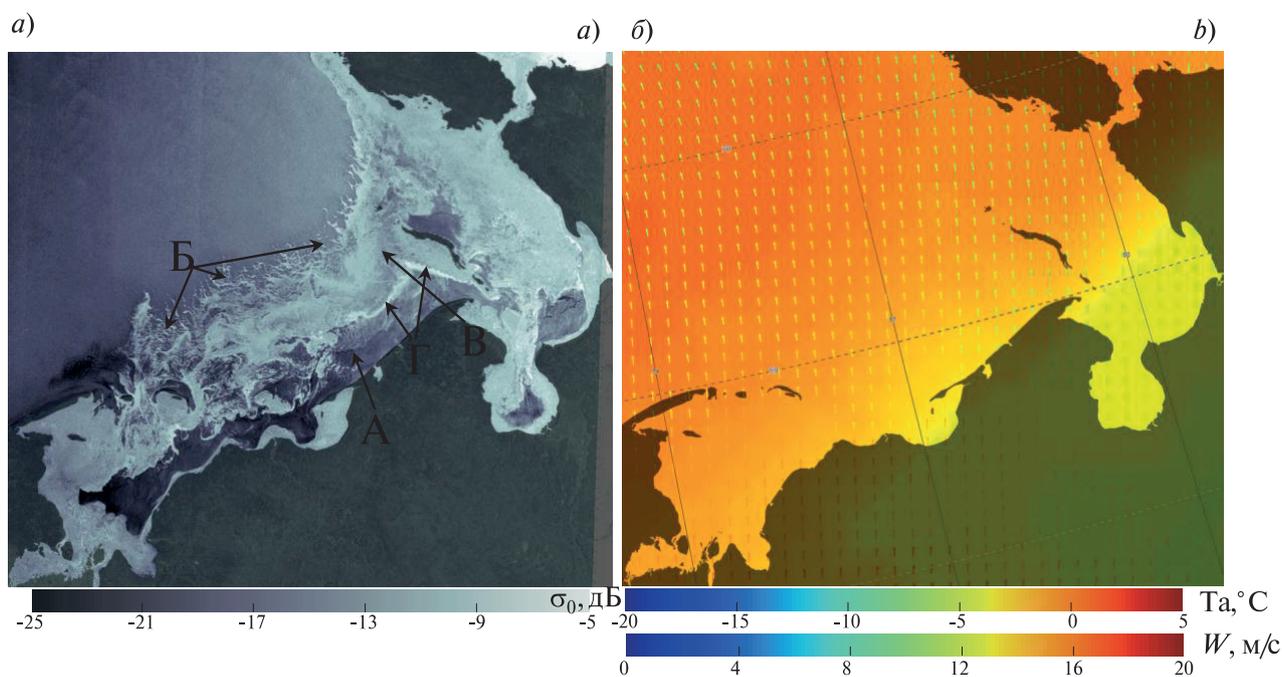


Рис. 1. Состояние Печорского моря 1 декабря 2019: *a* — удельная эффективная площадь рассеяния (σ_0) по данным РСА Sentinel-1A на ГГ поляризации, 03:00 Гр. (А — зона полыньи с небольшим количеством ниласа и ледяного сала, Б — полосы и пятна ниласа и серого льда, В — сплоченный серо-белый лед толщиной до 30 см, Г — зоны торосов, образовавшихся при сжатии льдов на границе полыньи под длительным воздействием южного ветра); *б* — среднесуточные модельные поля температуры воздуха приповерхностного слоя атмосферы (T_a) и наложенные на него вектора ветра (W).

Fig. 1. Statement of the Pechora Sea 01.12.2019: *a* — Normalized Radar Cross Section (σ_0) measured by Sentinel-1A at HH polarization on December 1, 2019 at 03:00 UTC (A — polynya with a small amount of nilas and grease ice, B — nilas and gray ice bands and patches, V — compact gray-white ice up to 30 cm thick, G — zones of hummocks formed as a result of sea ice compression on the polynya border during prolonged influence of the southern wind); *b* — daily mean field of the model air temperature in the near-surface atmospheric layer (T_a) and superimposed surface wind vectors (W) on December 1, 2019.

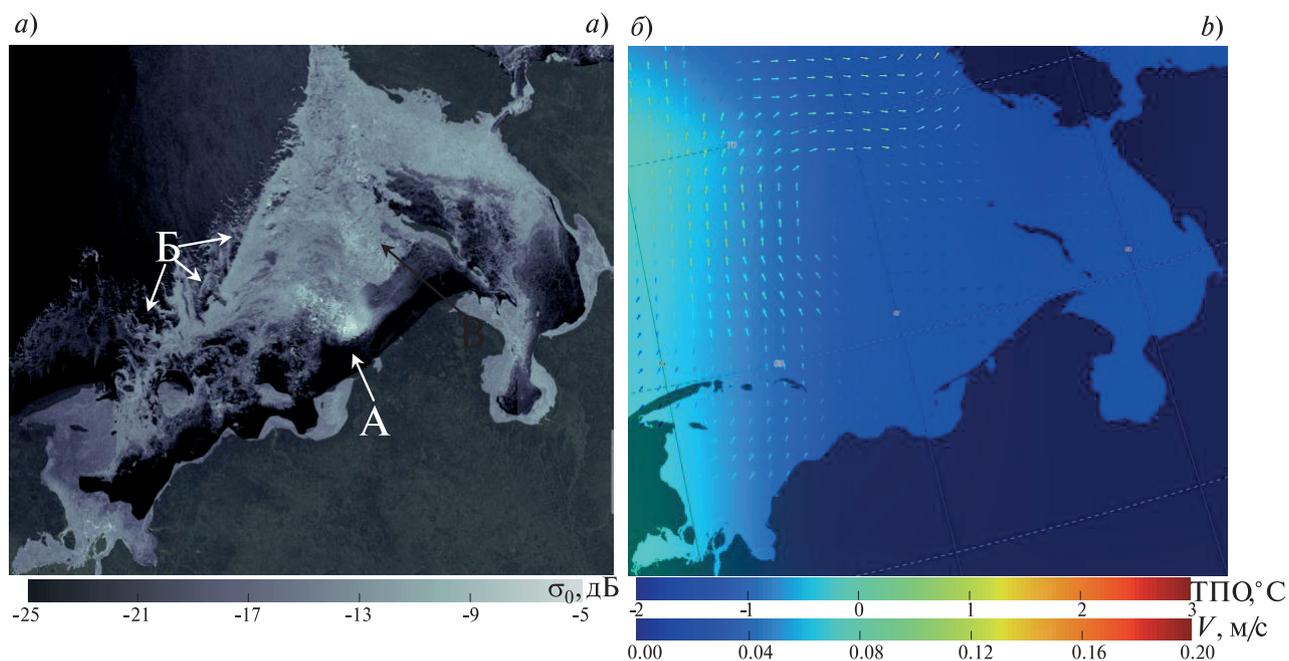


Рис. 2. Состояние Печорского моря в середине декабря 2019: *a* — удельная эффективная площадь рассеяния (σ_0) по данным РСА Sentinel-1В на ГГ поляризации 20 декабря 2019 г. 03:40 Гр. (А — полынья, Б — полосы и пятна ниласа и серого льда, В — сплоченный серо-белый лед толщиной 20–30 см); *б* — модельное поле температуры поверхности океана (ТПО) за период 16–22 декабря 2019 г. и наложенное на него поле векторов скорости течений (V) за период 17–21 декабря 2019.

Fig. 2. Statement of the Pechora Sea in the middle of December, 2019: *a* — Normalized Radar Cross Section (σ_0) measured by Sentinel-1A at HH polarization on December 20, 2019 at 03:40 UTC: (A — polynya, B — nilas and gray ice bands and patches, V — compact gray-white ice up to 20–30 cm thick); *b* — mean field of the model sea surface temperature (SST) for the period of December 16–22, 2019 and superimposed surface current velocity vector field (V) for the period of December 17–21, 2019.

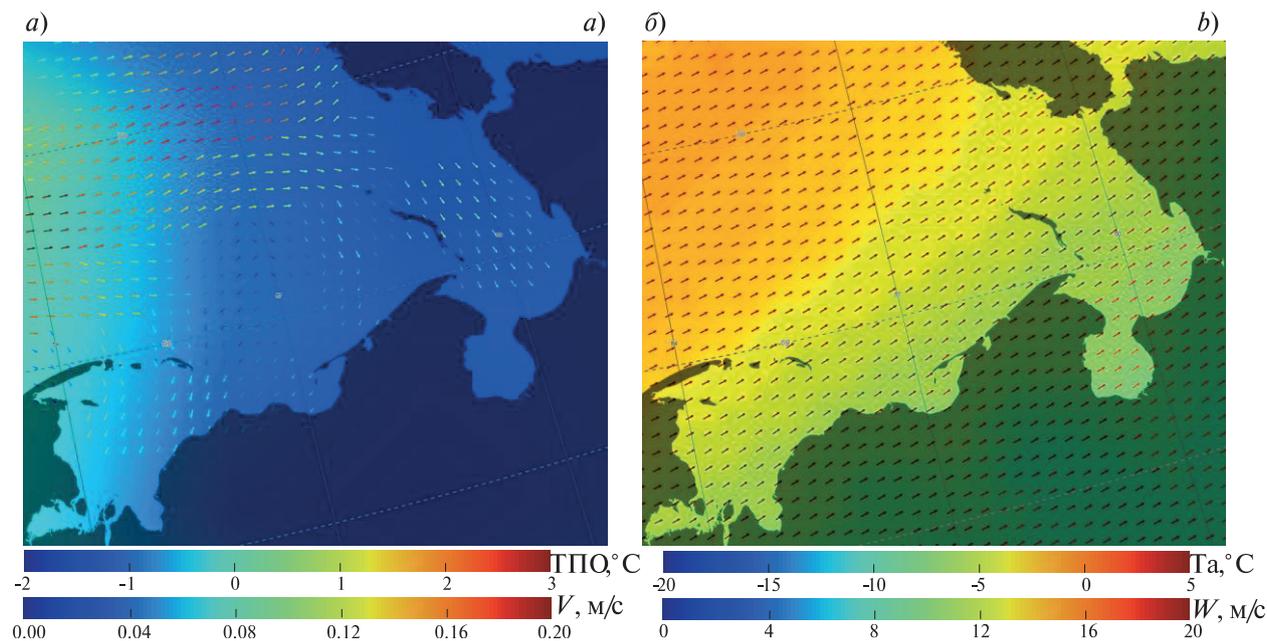


Рис. 4. Состояние Печорского моря на конец декабря 2019: *a* — поле ТПО за период 23–29 декабря 2019 г. и наложенное на него поле векторов скорости течений (V) за период 27 декабря 2019–1 января 2020; *б* — среднесуточное поле температуры воздуха приповерхностного слоя атмосферы и наложенное на него поле векторов ветра (W) 30 декабря 2019.

Fig. 4. Statement of the Pechora Sea at the end of December, 2019: *a* — SST field for the period of December 23–29, 2019 and superimposed surface current velocity vector field for the period of December 27, 2019 – January 1, 2020; *b* — daily mean field of the model air temperature in the near-surface atmospheric layer and superimposed surface wind vectors (W) on December 30, 2019.

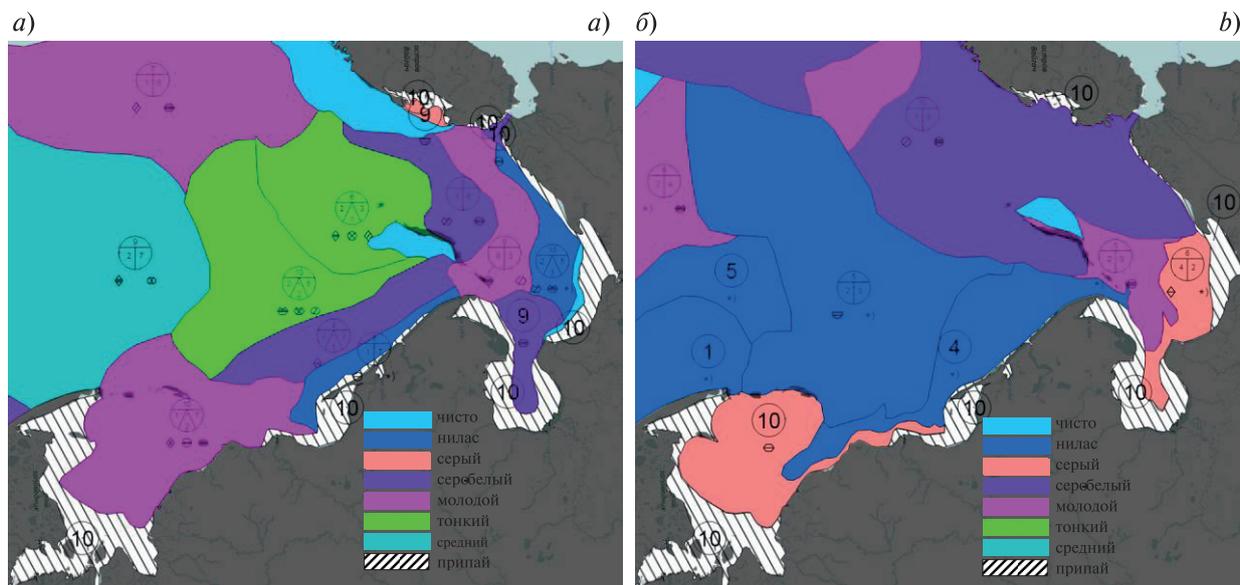


Рис. 6. Карты возрастного состава льда (преобладающая возрастная градация) в Печорском море, построенные специалистами Лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ в национальной российской символике для оперативного ледового обеспечения работы платформы «Приразломная»: *a* — 4 февраля 2020 г.; *б* — 18 февраля 2020 г.

Fig. 6. Sea ice type (predominant sea ice age) maps for the Pechora Sea, built by the ice experts of the RSHU Satellite Oceanography Laboratory in Russian national symbol scheme for the operational sea ice support of the Platform “Prirazlomnaya” *a* — February 4, 2020; *b* — February 18, 2020.