

ОКЕАНОЛОГИЯ
OCEANOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>

УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Применение данных судового телевизионного комплекса
в оперативном гидрометеорологическом обеспечении
морской деятельности на примере картирования толщины
ледяного покрова в Арктике**

Е.В. Афанасьева^{1,2}, С.С. Сероветников¹, Т.А. Алексеева^{1,2}, Е.А. Гришин¹,
А.А. Солодовник¹, Н.А. Филиппов¹*

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

² — Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

**afanasieva@aari.ru*

Резюме

В работе поднят вопрос о необходимости получения достоверных натуральных данных о толщине ледяного покрова для обеспечения более высокой точности информационной продукции, выпускаемой национальными ледовыми службами, в частности ледовых карт, которые являются базовым элементом оперативного гидрометеорологического обеспечения морской деятельности в пределах Северного морского пути (СМП) и примыкающих к нему акваториях. Предложено решение проблемы путем размещения на современных атомных ледоколах и судах усиленного ледового класса Arc7 автоматизированных судовых телевизионных метеорологических комплексов (СТМК), позволяющих получать достоверные данные о толщине льда и других сопутствующих гидрометеорологических параметрах непосредственно во время движения судна во льдах. В настоящее время растущее число судов усиленного ледового класса является единственной доступной по экономическим причинам инфраструктурой, пригодной для развертывания наземной распределенной сети оперативного мониторинга гидрометеорологических условий на трассах СМП.

Ключевые слова: Арктика, дистанционное зондирование, ледовая карта, ледовая навигация, натурные измерения, Северный морской путь, судовый телевизионный комплекс, толщина льда.

Для цитирования: Афанасьева Е.В., Сероветников С.С., Алексеева Т.А., Гришин Е.А., Солодовник А.А., Филиппов Н.А. Применение данных судового телевизионного комплекса в оперативном гидрометеорологическом обеспечении морской деятельности на примере картирования толщины ледяного покрова в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 96–117. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>.

Поступила 19.05.2022

После переработки 06.06.2022

Принята 08.06.2022

Mapping the thickness of sea ice in the Arctic as an example of using data from a ship-based television complex for operational hydrometeorological support of maritime activities

Ekaterina V. Afanasyeva^{1,2*}, Sergei S. Serovetnikov¹, Tatiana A. Alekseeva^{1,2},
Evgeniy A. Grishin¹, Aleksandr A. Solodovnik¹, Nikita A. Filippov¹

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

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

*afanasieva@aari.ru

Summary

Sea ice charts produced by the ice services of the world are among the most widely used sources of information about sea ice conditions in the Arctic. The absolute majority of sea ice charts are based on visual expert analysis of satellite imagery accompanied by auxiliary data including ground information from coastal stations and ships navigating the Northern Sea Route (NSR). Ground measurements of sea ice thickness are necessary for validating the results of satellite imagery interpretation. Shipboard observations are highly valuable because, unlike coastal stations, the ships provide information about sea ice cover straight on the navigational routes, not in the coastal areas of land-fast ice, where the thickness values are not fully representative of the ice in the open sea. However, the current system of shipboard observations used by commercial fleets often does not meet the reliability requirements due to the human factor involved in the process of data collection.

In the early 2000s, the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) suggested a new methodology for shipboard ice thickness measurement. A ship-based television complex (STC) was developed in order to exclude the human factor and standardize observations. The inaccuracy value was estimated as 3.8 % of the real thickness. By 2018, STC had been upgraded to a new ship-based television meteorological complex (STMC) allowing continuous automatic measurement of ice thickness and many other related hydrometeorological parameters during the entire voyage.

The automatic and autonomous operation of the new equipment allows placing it on board the ship without the need for an ice specialist to be permanently present. It means that STMC can be used by commercial fleets, which constantly increase the number of Arc7 ice class vessels they use. For economic reasons, reinforced ice class vessels, whose number is growing, represent the only available infrastructure suitable for the deployment of distributed network providing operational hydrometeorological monitoring on the NSR.

A comparison of STC data with AARI ice charts has revealed that real-time transmission of STC data from ships to the ice service office could increase the accuracy of ice charts and, as a consequence, the quality of the entire system of hydrometeorological informational support of maritime activities in the Arctic.

Keywords: the Arctic, ground measurements, ice thickness, Northern Sea Route, remote sensing, sea ice chart, sea ice navigation, ship-based television complex.

For Citation: Afanasyeva E.V., Serovetnikov S.S., Alekseeva T.A., Grishin E.A., Solodovnik A.A., Filippov N.A. Mapping the thickness of sea ice in the Arctic as an example of using data from a ship-based television complex for operational hydrometeorological support of maritime activities. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (2): 96–117. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>.

Received 19.05.2022

Revised 06.06.2022

Accepted 08.06.2022

ВВЕДЕНИЕ

Ледовые карты, выпускаемые ледовыми службами мира, являются одним из основных источников информации о состоянии ледяного покрова Арктики. Ледовые карты содержат в себе информацию о таких характеристиках ледяного покрова,

как общая сплоченность, возрастной состав льда (что является относительным показателем толщины), горизонтальные размеры ледяных полей, а также положение границы припайного льда. В данной работе мы сфокусируемся на толщине ледяного покрова как основном лимитирующем факторе для судоходства в пределах Северного морского пути (СМП) и других замерзающих акваторий.

Хорошо известно, что подавляющее большинство ледовых карт, выпускаемых национальными ледовыми службами, представляет собой результат визуального экспертного анализа спутниковых изображений, получаемых в различных диапазонах электромагнитного спектра, а именно: видимом, инфракрасном (ИК) и микроволновом (включает в себя пассивную и активную съемку), с привлечением вспомогательной гидрометеорологической информации с береговых станций и судов [1]. На сегодняшний день такие ледовые карты считаются наиболее достоверным видом информационной продукции. Некоторые ледовые службы, как, например, норвежская [2], достигли некоторых успехов в области автоматизации анализа спутниковых изображений, однако достижения эти касаются картирования общей сплоченности ледяного покрова, и авторы также указывают на то, что данный вид информационной продукции «производится без участия человека и не имеет гарантий качества» [2, раздел “Automatic Sea Ice Analysis”]. Карты в ледовых службах мира по-прежнему основываются на визуальном анализе спутниковых изображений, выполняемом ледовыми экспертами, имеющими соответствующую квалификацию. Данный тезис подтверждается также специалистами ледовой службы Канады: «Несмотря на... длинную историю развития автоматизированных методов, ледовые службы по-прежнему полагаются на карты, создаваемые экспертами вручную, для определения ледовых условий...» [3, с. 1291]. Хотя речь в работе канадских специалистов идет об общей сплоченности льда, данный тезис, даже в большей степени, справедлив и для картирования возрастного состава льда. Определение возраста льда представляет собой намного более сложную задачу, для ее решения необходимо учитывать очень большое число факторов, всю совокупность которых машинные алгоритмы учесть не способны.

Как говорилось выше, вся собранная спутниковая информация всегда анализируется в комплексе с вспомогательными данными, которые включают в себя данные о погоде (температура воздуха, скорость и направление приводного ветра), расчетное поле дрейфа льда с момента предшествующего анализа, натурные измерения толщины припайного льда в районах береговых станций, а также данные наблюдений за ледовой обстановкой, поступающие с судов, находящихся в пределах анализируемых акваторий.

Следует отдельно отметить ценность натуральных наблюдений, которые поступают с береговых станций и судов. По сути, при анализе спутниковых изображений они выступают в качестве реперных. Особенно большой ценностью обладают данные судовых наблюдений, поскольку они выполняются в дрейфующих льдах непосредственно в районах судоходных трасс. Наблюдения на береговых станциях выполняются на припайном льду, что в большинстве случаев не вполне репрезентативно для дрейфующих льдов на удалении от берега.

При наличии достоверных натуральных данных эксперт, анализирующий спутниковые изображения, сопоставляет яркостные, тональные и текстурные характеристики льда, толщина которого известна, с яркостью, тоном и текстурой льда, находящегося в пределах сцены спутниковой съемки. Это помогает более успешно определять возраст ледяного покрова. Очевидно, что расширение сети натуральных наблюдений напрямую бы способствовало повышению точности экспертного анализа и, как следствие, точности ледовых карт, выпускаемых национальными ледовыми службами.

Отмечается, что на протяжении последних десятилетий в Арктике имеет место устойчивый рост судоходного траффика, что в первую очередь связано с существенным смягчением ледовых условий плавания в акватории СМП по сравнению с концом XX в., а также активным строительством и вводом в эксплуатацию атомных ледоколов нового поколения и большого числа судов усиленного ледового класса Arc7, предназначенных для транспортировки топливно-энергетических и других ресурсов, добываемых в Арктической зоне Российской Федерации. С учетом избранного курса развития российской экономики, в котором Арктической зоне отводится одно из ключевых мест, ожидается, что данная тенденция будет сохраняться.

Для национальных ледовых служб, занимающихся мониторингом ледовых условий в морях Российской Арктики, данная перспектива представляется положительной в том плане, что растущее число судов, способных круглый год курсировать вдоль трассы СМП и регулярно предоставлять оперативные данные о метеорологической и ледовой обстановке, в настоящее время является единственной доступной по экономическим причинам инфраструктурой, пригодной для организации распределенной сети оперативного мониторинга гидрометеорологических условий на трассе СМП и в прилегающих районах.

Однако, как будет показано ниже, система судовых ледовых наблюдений, действующая в настоящее время на судах коммерческого флота, часто не отвечает требованиям качества и достоверности. Это связано с рядом причин, среди которых отсутствие на борту штатного гидрометеоролога (его обязанности, как дополнительные, возложены на штурманский состав экипажей), отсутствие специальной подготовки по производству ледовых наблюдений и недостаток времени на дополнительные работы во время основной вахты.

В начале 2000-х гг. в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) была предложена новая технология сбора натурных данных о толщине ледяного покрова непосредственно во время движения судна во льдах. С целью получения максимально достоверных оценок был разработан специальный инструмент — судовой телевизионный комплекс (СТК) [4], позволяющий нивелировать человеческий фактор в процессе сбора данных о толщине морского льда [5, 6].

Изначально СТК предназначался для сбора достоверных натурных данных о толщине льда в ходе высокоширотных арктических экспедиций ААНИИ и дальнейшего проведения научных исследований на основе собранного материала. К 2018 г. в проект СТК был внесен ряд значительных дополнений, позволяющих, помимо толщины льда, собирать информацию и о других гидрометеорологических характеристиках: температуре и относительной влажности воздуха, атмосферном давлении, скорости и направлении ветра, дальности видимости, высоте нижней границы облачности, общей сплоченности ледяного покрова, наличии сжатий во льду, а также о параметрах движения судна: географическом положении, скорости, курсе, задействованной мощности двигательных установок [7]. Модернизированная версия проекта получила название судовой телевизионный метеорологический комплекс (СТМК). В отличие от СТК, модернизированный комплекс предусматривает автоматическое функционирование, не требующее присутствия профильного специалиста на борту судна, а значит, оборудование может быть размещено на судах, состав экипажей которых не предусматривает наличия штатного гидрометеоролога, в том числе на судах коммерческого флота. При оперативной передаче данных СТМК на адрес национальной ледовой службы эти данные могут послужить источником чрезвычайно ценной и полезной информации для производства ледовых информационных продуктов, в частности ледовых карт, а также внести значительный вклад в улучшение качества выпускаемой продукции.

В настоящей работе мы обсудим потенциал автоматизированных судовых комплексов СТМК как источника достоверных натурных данных о толщине льда для нужд оперативного гидрометеорологического обеспечения в перспективе круглогодичной навигации в акватории СМП.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Карты ледовой обстановки ААНИИ

В качестве результата визуального экспертного анализа спутниковых изображений рассмотрим ледовые карты, которые регулярно составляются экспертами ААНИИ. Согласно информации из документа Всемирной метеорологической организации (ВМО) «Ледовые информационные службы мира» [8], а также публикации самих специалистов ААНИИ [1], ледовые карты составляются на основе комплексного анализа спутниковых изображений видимого и ИК диапазонов, радиолокационных изображений, а также данных спутниковой микроволновой радиометрии. Спутниковая информация анализируется в комплексе с вспомогательными данными о погоде, дрейфе льда, данными, поступающими с сети береговых станций Росгидромета, а также данными, передаваемыми на адрес ААНИИ с судов, работающих на трассах СМП и в других замерзающих морях, омывающих территорию России.

При анализе спутниковых изображений каждый ледовый эксперт руководствуется знанием уникальных дешифровочных признаков различных возрастных градаций (или типов) морского льда, регламентированных документом ВМО «Номенклатура ВМО по морскому льду» [9]. Дешифровочные признаки того или иного типа льда, изображенного на снимке, представляют собой сочетание тональных и текстурных характеристик в совокупности с общей структурой ледяного покрова. Под структурой здесь подразумеваются такие особенности, как, например, частота и взаимная ориентация каналов и разводий во льду, размер и форма встречающихся ледяных полей и т. п.

Экспертный анализ спутниковых изображений морского льда, по сути, заключается в обнаружении и выделении зон, ледовые условия внутри которых однородны, с последующим присвоением этим зонам соответствующих ледовых характеристик: сплоченность, возраст, размеры полей. Пример этого процесса приведен на рис. 1.

Дешифровочные признаки возрастных градаций льда приведены в ряде монографий и руководств по дешифрированию спутниковых изображений, опубликованных как отечественными, так и зарубежными авторами [10, 11]. Однако в реальной практике определение возраста морского льда зачастую бывает неоднозначно, так как характер его отображения может существенно отличаться от тех примеров, которые даны в руководствах. Проблема заключается в том, что отображение льда на спутниковых снимках определяется целым рядом параметров, среди них наслоенность, торосистость льда, фазовый состав ледяной толщи (количественное соотношение воды, льда и воздуха), количество морской соли во льду, высота снега на его поверхности и т. д., которые, в свою очередь, напрямую зависят от внешних условий формирования и развития ледяного покрова в природной среде. Условия эти могут быть самыми разнообразными. Формирование и развитие ледяного покрова может происходить и при сильном морозе, и при слабоотрицательных температурах воздуха; при штормовом ветре и на тихой воде; вблизи стока пресных речных вод и в открытом море; при интенсивных атмосферных осадках и при их отсутствии и т. д. При таком широком спектре внешних условий формируются льды, имеющие самые разнообразные дешифровочные признаки на спутниковых изображениях, что естественным образом усложняет процесс их дешифрирования. Более подробно теория

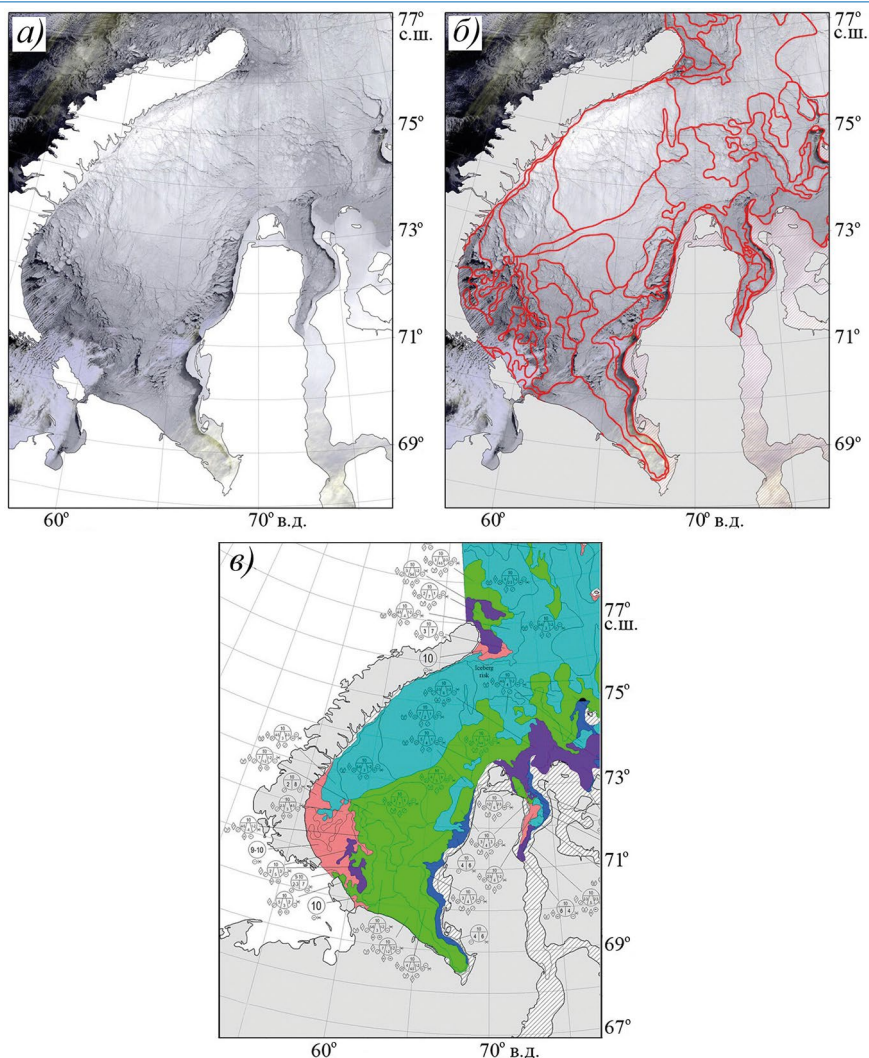


Рис. 1. Процесс создания ледовой карты:

а) исходное спутниковое изображение, полученное 15 апреля 2019 г. со спутника Suomi-NPP (VIIRS) в тепловом ИК-диапазоне; б) спутниковое изображение с нанесенными границами однородных ледовых зон; в) ледовая карта, отражающая возрастной состав ледяного покрова в юго-западной части Карского моря в период с 14 по 16 апреля 2019 г.

Fig. 1. The process of sea ice charting:

а) thermal infrared satellite image obtained on April 15, 2019 from Suomi-NPP (VIIRS); б) The image with delineated homogeneous ice zones; в) the chart of ice age composition in the south-western Kara Sea on April 14–16, 2019

дистанционного зондирования морского льда и механизмы влияния перечисленных факторов на отображение льда на спутниковых изображениях изложены в [12].

В случаях возникновения неоднозначностей при определении возраста льда, что в повседневной практике часто имеет место, эксперт руководствуется знанием общих закономерностей формирования и развития ледяного покрова в пределах

анализируемой акватории (иными словами, знанием ледового режима), а также представлением об особенностях развития ледяного покрова в текущем сезоне. Оценить возраст льда помогает также информация о погодных условиях, в частности сумме градусо-дней мороза, с момента осеннего ледообразования.

Для того чтобы подтвердить или опровергнуть свое предположение, ледовый эксперт обращается к данным натурных наблюдений, в том числе данным из диспетчерских сообщений судов. В случае если предположение было неверно, эксперт корректирует результат своей работы с учетом имеющихся данных. Именно поэтому ледовая информация, оперативно поступающая с судов на адрес ААНИИ, чрезвычайно важна для ледовых аналитиков. И чем гуще сеть натурных наблюдений, чем более равномерно она распределена по площади анализируемой акватории, тем результат экспертного анализа спутниковых изображений будет точнее и качественнее.

В настоящее время такую распределенную сеть натурных гидрометеорологических наблюдений, в том числе ледовых, формируют новые суда усиленного ледового класса, количество которых с каждым годом растет.

Визуальные судовые наблюдения за ледовой обстановкой

Большинство судов, работающих в морях Российской Арктики, ежедневно передают свои диспетчерские сообщения на адрес ААНИИ. Эти сообщения содержат в себе стандартные навигационные данные, такие как название и идентификационный номер судна, его географические координаты, курс, скорость и др., а также данные метеорологических и ледовых наблюдений в точке, где находилось судно на момент составления сообщения. Как правило, диспетчерские сообщения передаются один или два раза в сутки. Полный список параметров и порядок передачи диспетчерских сообщений регламентированы Правилами плавания в акватории СМП [13].

Наблюдения за состоянием ледяного покрова на судне производятся вахтенным штурманом визуально с ходового мостика. Оцениваются следующие параметры: общая сплоченность льда по десятибальной шкале, возраст льда с указанием частной сплоченности, наслоенность льда, торосистость, наличие и интенсивность сжатий во льду, разрушенность ледяного покрова. Также в состав диспетчерских сообщений включается информация о наблюдаемых ледовых явлениях — интенсивный дрейф, ледовая река и др. Визуальные ледовые наблюдения рекомендуется выполнять в соответствии с Руководящими документами Росгидромета [14] и методическим пособием, составленным ведущими специалистами ААНИИ [15].

Возраст льда, как относительный показатель толщины, определяется по характерным внешним признакам различных возрастных градаций. К таким внешним признакам относятся: цвет и тон льда, количество и характер распределения снега на его поверхности, количество гряд торосов, их высота и форма, характер взаимодействия льда с корпусом судна (например, характер распространения трещин во льду при прохождении судна) и др. Толщина также может оцениваться по боковым сколам льдин, выворачиваемых вдоль борта, при их визуальном сопоставлении с элементами конструкции судна на нижней палубе, горизонтальные размеры которых известны (леер, кнехт и др.).

Ледовый наблюдатель фиксирует параметры ледовой обстановки в районе плавания, ограниченном секторами, показанными на рис. 2, размер которых может сокращаться в зависимости от условий метеорологической дальности видимости.

Как уже упоминалось выше, существенное смягчение ледовых условий в Арктике, а также строительство и ввод в эксплуатацию современных судов усиленного ледового класса Arc7 в настоящее время позволяют постепенно переходить на круглогодичный режим навигации во всех арктических морях России. В частности, возможность круглого-

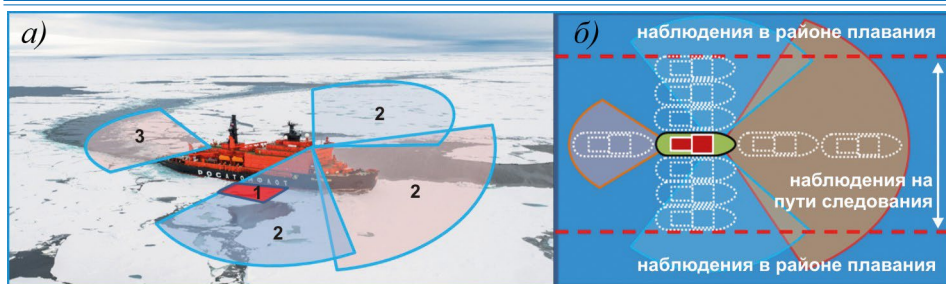


Рис. 2. Схема проведения ледовых наблюдений:

а) схема секторов и площадок ледовых наблюдений: 1 — площадка оценки толщины льда по боковым сколам выворачиваемых льдин, 2 — секторы обзорных наблюдений состояния ледяного покрова, 3 — сектор оценки сжатия; б) вид сверху

Fig. 2. The scheme of shipboard ice observations:

а) sectors and areas of ice observations: 1 — the area for estimating the thickness of ice floes turning up under the pressure of the ship's hull, 2 — the sectors for overview observations of sea ice conditions, 3 — the sector for estimating compression in ice; б) top view

дичной навигации в Восточно-Сибирском море была показана в 2018 г. специалистами Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова [16].

С точки зрения специалиста ледовой службы, занимающегося подготовкой информационной продукции для гидрометеорологического обеспечения, рост судоходного трафика означает, что в его распоряжении появляется все большее количество натурных наблюдений за ледовой обстановкой в районе судоходных трасс, которые могут быть включены в анализ при составлении, в частности, ледовых карт. Как уже было сказано, наличие достоверных натурных данных помогает более успешно дешифровать возраст льда на спутниковых изображениях, что, как ожидается, должно способствовать повышению точности результирующих ледовых карт как элемента гидрометеорологического обеспечения.

Однако, как показывает практика, данные, поступающие с судов, далеко не всегда отвечают требованиям качества. Для того чтобы в условиях плавания правильно определять возраст и другие параметры ледяного покрова, наблюдателю необходим большой опыт ведения ледовых наблюдений под наставничеством старшего высококвалифицированного специалиста. Как правило, у членов экипажей коммерческих судов такой опыт минимален или отсутствует. Проблема усугубляется тем, что зачастую наблюдения в Арктике приходится выполнять в условиях плохой видимости — тумана, морозной дымки, полярной ночи.

Так, на рис. 3 изображены маршруты газозовов «Кристоф де Маржери» и «Николай Евгенов» в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море при их следовании транзитным рейсом с запада на восток через акваторию СМП в первой половине января 2021 г. Оба судна имеют ледовый класс Arc7, что позволило им совершить этот сверхпоздний рейс. На показанном участке маршруты судов полностью совпадали с той лишь разницей, что «Кристоф де Маржери» проследовал его полутора сутками ранее (12.01.2021), чем «Николай Евгенов» (13–14.01.2021).

Анализ спутниковых изображений показал, что в период с 12 по 14 января 2021 г. в рассматриваемом регионе значительного дрейфа льда не наблюдалось. Это позволяет заключить, что оба судна следовали друг за другом через один и тот же лед и существенной разницы в значениях толщины, передаваемых этими судами, быть не должно. Однако из рис. 4 видно, что в целом по всему маршруту «Николай

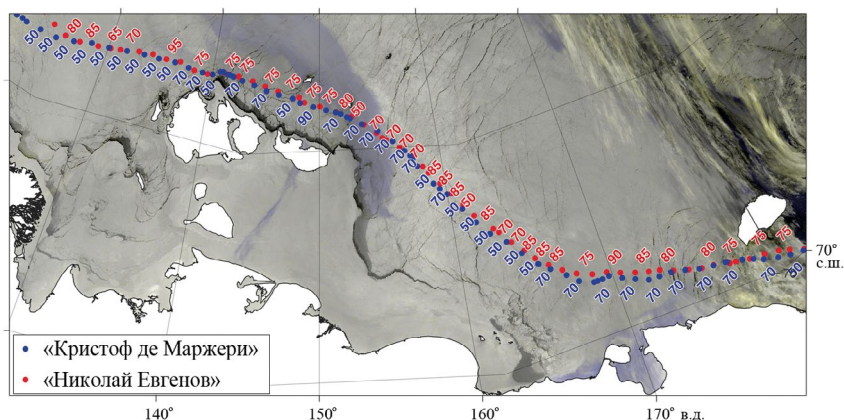


Рис. 3. Маршруты газозовов «Кристоф де Маржерии» и «Николай Евгенов» в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море при их следовании через акваторию СМП в январе 2021 г.

Числами вдоль маршрутов показаны значения толщины льда из диспетчерских сообщений судов. Маршруты наложены на спутниковое изображение, полученное 12 января 2021 г. со спутника Suomi-NPP (VIIRS) в тепловом ИК-диапазоне

Fig. 3. The routes of LNG/Cs “Christophe de Margerie” and “Nikolay Yevgenov” in the Laptev and East Siberian seas during their transit voyage through the Northern Sea Route in January 2021.

The numbers along the tracks indicate the values of sea ice thickness from the LNG/Cs ice reports. The routes are laid on a thermal infrared image obtained on January 12, 2021 from Suomi-NPP (VIIRS)

Евгенов» передавал большие по сравнению с «Кристофом де Маржерии» значения толщины, при этом на отдельных участках разница достигала 35 см.

Возрастные градации льда, указываемые на картах ледовой обстановки, подразумевают под собой определенные интервалы толщины льда (см. Номенклатуру ВМО по морскому льду [9]). Так, лед толщиной от 30 до 70 см относится к градации «однолетний тонкий лед», от 70 до 120 см — к градации «однолетний средний лед», свыше 120 см — «однолетний толстый лед» и др. Если значения толщины льда, переданные разными судами в одной и той же географической точке, попадают в одну и ту же возрастную градацию, то различия в показаниях наблюдателей не являются столь критичными, в отличие от обратного случая, когда значения толщины льда попадают в разные возрастные

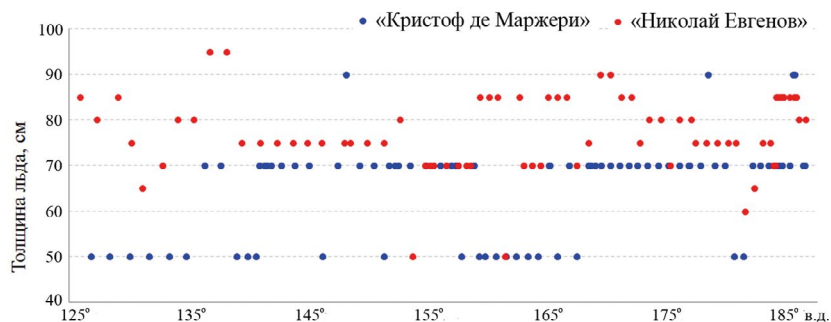


Рис. 4. Оценка толщины льда на пути следования газозовов «Кристоф де Маржерии» и «Николай Евгенов» по данным диспетчерских сообщений судов

Fig. 4. The values of sea ice thickness on the routes of LNG/Cs “Christophe de Margerie” and “Nikolay Yevgenov”, according to their ice reports

градации. Как видно из рис. 4, такие ситуации на маршруте газозовов встречались повсеместно, особенно на отрезке пути к западу от меридиана 140° в. д. и в районе между меридианами 160° и 173° в. д., где «Николай Евгенов» передавал толщины однолетнего среднего льда, а «Кристоф де Маржери» — однолетнего тонкого.

Подобные разногласия между наблюдениями приводят к тому, что, несмотря на чрезвычайную ценность натуральных наблюдений, степень доверия к ним у ледовых аналитиков, работающих в системе гидрометеорологического обеспечения, падает.

Становится очевидным, что для снижения субъективности визуальных оценок ледовых условий в районе плавания наблюдения за ледовой обстановкой должны быть стандартизированы. Стандартизация измерений может быть достигнута через разработку и внедрение инструментальных технологий сбора данных.

Судовой телевизионный комплекс СТК и автоматизированный судовой модуль СТМК

С целью обеспечения высоко детализированной оценки ледовых условий сотрудниками ААНИИ с 2000-х гг. прорабатывались различные варианты инструментализации процесса судовых наблюдений. В результате был разработан судовой телевизионный комплекс СТК, состоящий из основного видеорегистратора выворотов льда у борта судна с наложенной измерительной сеткой и системы периферических камер, регистрирующих обстановку вокруг судна. Данный комплекс закрепляется на элементах конструкции судна и производит съемку контролируемых зон с заданной частотой, одновременно осуществляя автоматическую пространственно-временную привязку снимков, накапливаемых на специальных носителях. Обработка накапливаемых данных производится выборочно ледовым специалистом на судне, а полная обработка осуществляется в отложенном режиме по завершении рейса (рис. 5).

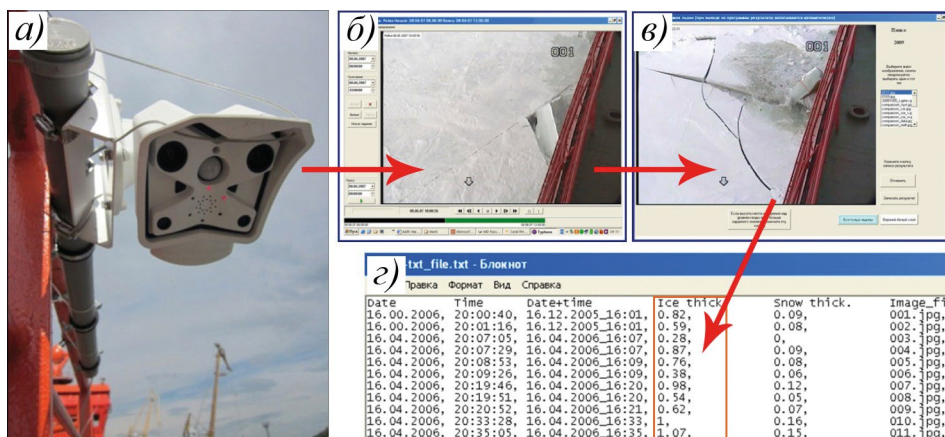


Рис. 5. Схема избирательной оценки толщины льда, выполняемой ледовым наблюдателем с помощью блока толщиномера СТК.

а) внешний вид основного видеорегистратора СТК; б) интерфейс специализированного программного обеспечения (ПО) для отбора изображений выворотов льда; в) интерфейс специализированного ПО для определения толщины льда; г) таблица выходных данных

Fig. 5. The principle of selective ice thickness assessment provided by an ice observer with the use of an STC module.

а) the view of STC video recorder; б) Specialized software interface for selecting the images of turned-up ice floes; в) specialized software interface for determining the thickness of ice; г) the table of output data

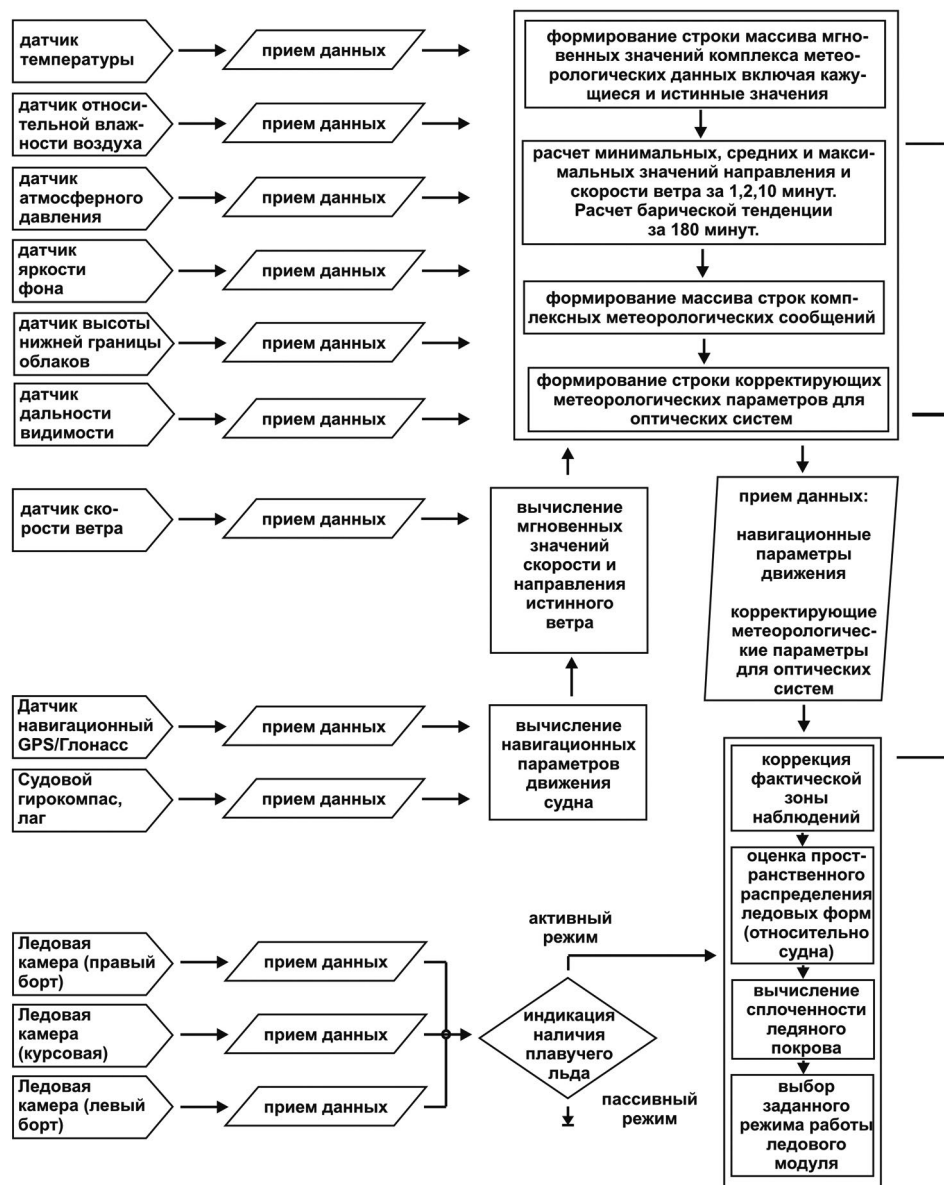
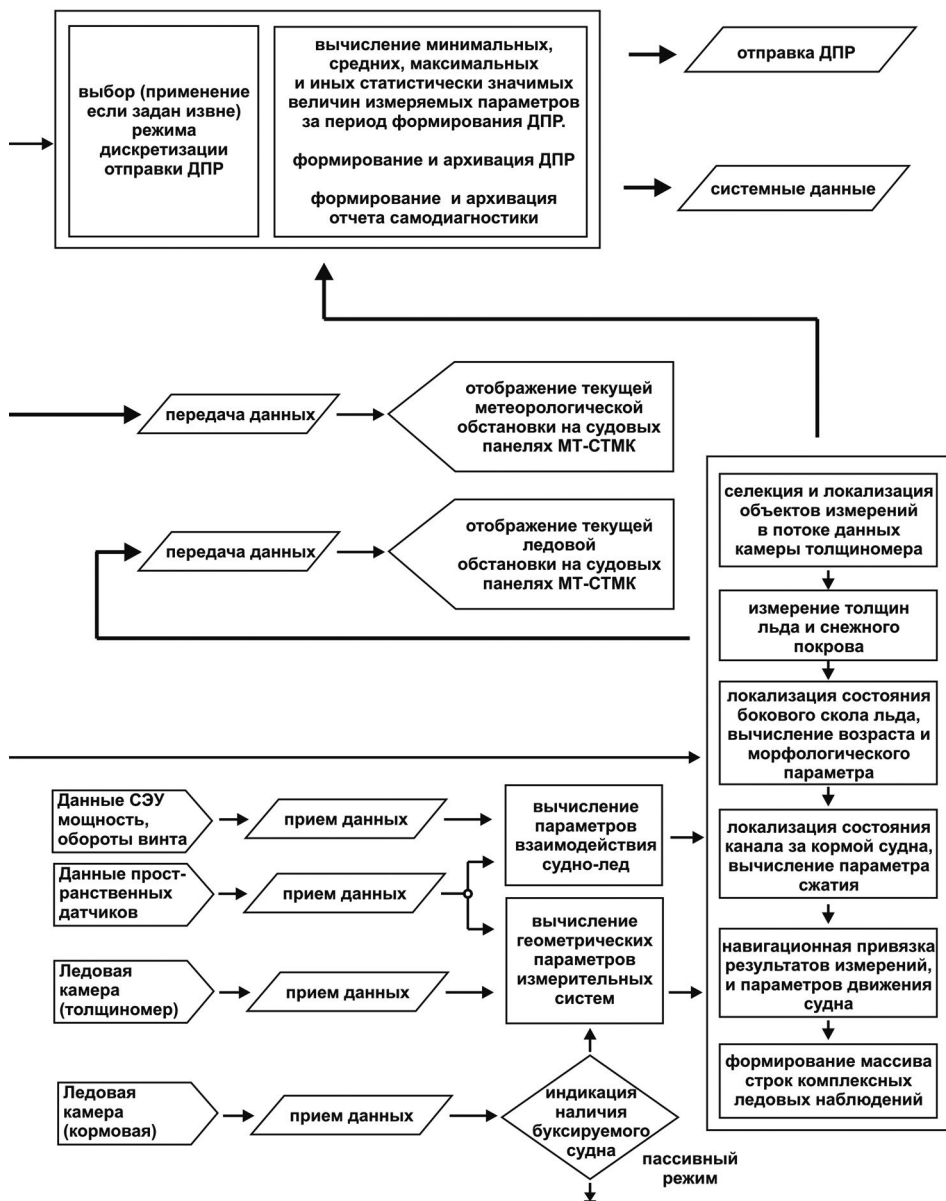


Рис. 6. Принципиальная схема

Fig. 6. Schematic diagram



модуля СТМК
of the STMC module

Главными преимуществами использования толщиномера СТК являются непрерывность и высокая детализация наблюдений. В отличие от данных из диспетчерских сообщений, передаваемых один или два раза в сутки и описывающих ледовые условия в одной географической точке, СТК позволяет производить измерения непрерывно в автономном режиме на протяжении всего рейса. Кроме того, в ходе экспедиционных рейсов ААНИИ применение СТК позволило устранить фактор субъективности при оценке толщины ледяного покрова. Сравнение фактических значений толщины льда и их измерений с помощью СТК показало, что различия не превышают 3,8 %, тогда как погрешность визуальных наблюдений при использовании рейки с 10-сантиметровыми делениями составляет 10 см (то есть размер деления) и может быть существенно больше, если рейка при наблюдениях не используется [5, 17].

Основными недостатками СТК являются его низкая оперативность и невозможность передачи результатов регистрации в ситуационный центр ААНИИ ввиду их критически большого объема.

Благодаря накопленному за семнадцать лет архиву данных и приобретенному опыту наблюдений, выполненных с помощью различных вариаций комплекса СТК, стало возможным решение задачи полной автоматизации процесса проведения измерений и получения оперативных результатов без участия ледового наблюдателя, а также был решен вопрос оперативной передачи результатов в ситуационный центр посредством судовых систем связи, имеющих скромную пропускную способность.

В 2018 г. был разработан проект автоматизированного судового модуля СТМК, позволяющего, помимо толщины льда, также получать данные о сплоченности ледяного покрова, его возрасте, наличии и степени сжатия льда, сопутствующих метеорологических условиях, а также фактической ледопроеходимости судна-носителя. К 2020 г. была разработана модель комплекса и проведены испытания ключевых элементов системы в реальных условиях применения.

Судовой автоматизированный модуль СТМК сочетает в себе телевизионные системы регистрации ледовой обстановки в районе плавания, блок метеостанции, блок сопряжения с судовыми навигационными системами, сервер обработки данных, устройства отображения текущей информации на мостике судна, а также блок оперативной передачи данных и удаленного контроля (рис. 6).

Фактически СТМК заменяет собой 85 % функций ледового наблюдателя на борту судна и не требует наличия оператора, выполняя весь комплекс судовых наблюдений автоматически. Применительно к использованию на коммерческих судах, модуль СТМК позволит снять дополнительную нагрузку с вахтенного штурмана.

Будучи пригодным для самостоятельной работы на большинстве судов ледового класса, модуль СТМК позволит по мере внедрения создать распределенную сеть оперативного сбора ключевых натурных данных о фактическом состоянии ледяного покрова и сопутствующих параметрах на всем протяжении СМП.

Взаимодействуя с единым центром контроля и управления, планируемая сеть обеспечит непрерывный оперативный поток реперных данных для уточнения результатов работы ледовой информационной системы.

Сопоставление данных СТК с результатами экспертного анализа спутниковых изображений

Для того чтобы наглядно проиллюстрировать возможности внедрения новой технологии с использованием СТК (в модернизированной версии — СТМК) в работу системы оперативного гидрометеорологического обеспечения, обратимся к ледовым картам ААНИИ и сопоставим их с данными СТК, которые были получены специалистами института в ходе двух высокоширотных арктических экспедиций.

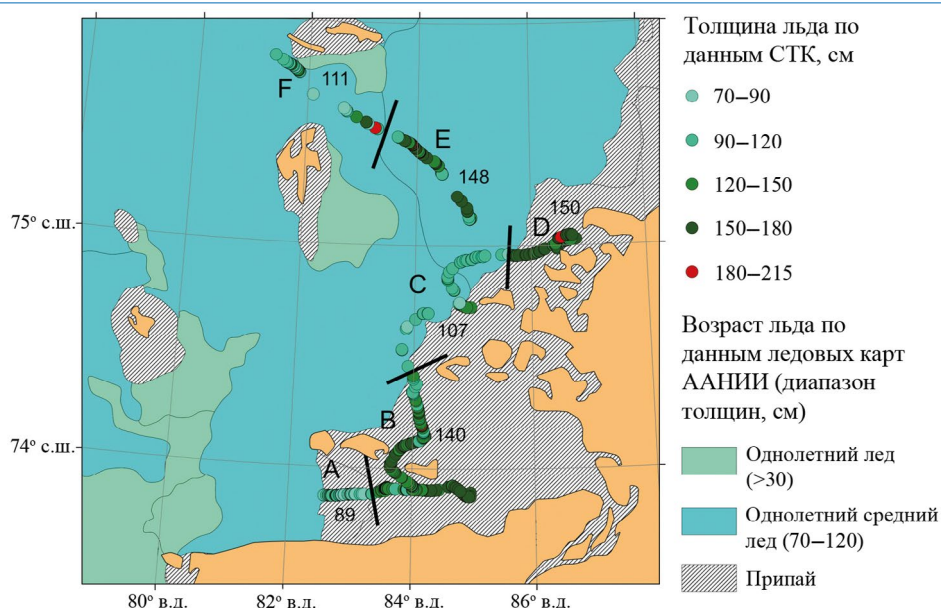


Рис. 7. Сопоставление данных СТК с результатом анализа спутниковых изображений, выполненного ледовым экспертом ААНИИ.

Спутниковые данные собраны за период с 16 по 18 мая 2021 г. Данные СТК получены специалистами ААНИИ в ходе экспедиционного рейса в Карском море в период с 10 по 18 мая 2021 г.

Fig. 7. Comparison of STC data with an AARI ice chart.

Satellite data was collected for the period of May 16–18, 2021. The data from STC was collected by AARI ice specialists in the Kara Sea on May 10–18, 2021

На рис. 7 приведен фрагмент ледовой карты Карского моря, составленной экспертом ААНИИ на основе анализа спутниковых изображений, собранных за период с 16 по 18 мая 2021 г. На карту нанесены точки, в которых в ходе экспедиционных работ с использованием СТК были собраны данные о толщине ледяного покрова. Работы проводились на грузовом судне типа Arc7 в районе Пясинского залива и островов Известий ЦИК в период с 10 по 18 мая 2021 г., при этом до 15 мая работы велись в припайном льду. По окончании рейса полученные данные были обработаны и пересчитаны в фактические значения толщины.

Далее весь маршрут экспедиционных работ был разделен на участки, попадающие в границы различных ледовых зон, выделенных ранее экспертом на ледовой карте. Характеристики, присвоенные каждой из ледовых зон, были сопоставлены со значением толщины от СТК, полученным путем осреднения всех измерений, попавших в соответствующую зону.

Таким образом, маршрут экспедиции был разделен на шесть однородных ледовых зон:

- в зоне А на ледовой карте отмечен припай, состоящий на 30 % из однолетнего толстого льда (>120 см) и на 70 % из однолетнего среднего льда (70–120 см). Средняя толщина льда в зоне, согласно данным СТК, равна 89 см, что хорошо согласуется с результатом экспертного дешифрирования спутниковых изображений;
- в зоне В ледовый эксперт отметил припай однолетнего толстого льда. По данным СТК, средняя толщина припая была равна 140 см, что также согласуется с оценкой эксперта;

– в зоне С на карте отмечен дрейфующий лед с преобладанием однолетнего среднего льда и включением однолетнего толстого в количестве 20–30 %. Средняя толщина льда по данным СТК составляла 107 см. Разногласий с результатом экспертного анализа не отмечено;

– в зоне D на карте отмечен припай однолетнего толстого льда. По данным СТК, его средняя толщина составляла 150 см, что совпадает с оценкой ледового эксперта;

– в зоне E на карте эксперт отметил преобладание однолетнего среднего льда с включением однолетнего толстого до 30 %. Согласно данным СТК, в зоне преобладал однолетний толстый лед со средней толщиной около 148 см. В данном районе имеет место недооценка толщины льда экспертом минимум на 30 см. Если бы ледовая карта составлялась с учетом данных СТК, поступающих на адрес ледовой службы ААНИИ в оперативном режиме, то обнаруженной недооценки можно было бы избежать;

– в зоне F ледовый эксперт отметил преобладание однолетнего среднего льда с включением однолетнего толстого в количестве 20–30 %. Данные СТК это подтверждают, средняя толщина льда в зоне была около 111 см.

Для того чтобы более полно проиллюстрировать потенциал оперативно поступающих данных от СТК, необходимо рассмотреть больше примеров их сопоставления с ледовыми картами, содержащими информацию о возрастном составе ледяного покрова. Согласно методике ледового картирования ААНИИ [1], возраст льда может быть определен по спутниковым изображениям только в течение зимнего сезона — с октября по май. Соответственно, данные СТК для сопоставления также должны быть получены в этот период года. Однако большая часть экспедиций в Арктике проводится в летний период, когда отмечается интенсивное таяние ледяного покрова. По этой причине на сегодняшний день «зимних» данных СТК в распоряжении ААНИИ крайне мало.

В такой ситуации имеет смысл проанализировать данные СТК наиболее ранних июньских экспедиций в паре с наиболее поздними майскими картами ледовой обстановки, сделав при этом поправку на дрейф льда в период времени, разделяющий эти два вида данных.

На рис. 8 данные СТК, собранные в ходе полусуточного рейса атомного ледокола «50 лет Победы» в период с 16 по 20 июня 2018 г., сопоставлены с результатом визуального анализа спутниковых изображений, собранных за период с 27 по 29 мая того же года. Стрелками показаны направление и величина дрейфа льда в период с 29 мая по 17 июня 2018 г., которые были получены по результатам анализа последовательных радиолокационных изображений спутников Sentinel-1. Изображения были взяты с Интернет-ресурса Датского технического университета [18]. Уменьшением толщины льда за счет таяния в данный период времени можно пренебречь, так как процессы таяния в приполюсном районе Арктики в начале-середине июня еще не так интенсивны.

При сравнении ледовой карты с данными СТК были получены следующие результаты:

– в зоне А на карте должен преобладать однолетний тонкий лед (30–70 см) с редкими включениями однолетнего среднего (70–120 см). Согласно данным СТК, толщина льда составляла около 68 см, что хорошо согласуется с ледовой картой;

– в зоне В на ледовой карте должен преобладать однолетний средний лед с редкими включениями однолетнего толстого (>120 см). По судовому треку видим, что включения однолетнего толстого льда в зоне присутствуют. Однако преобладает не

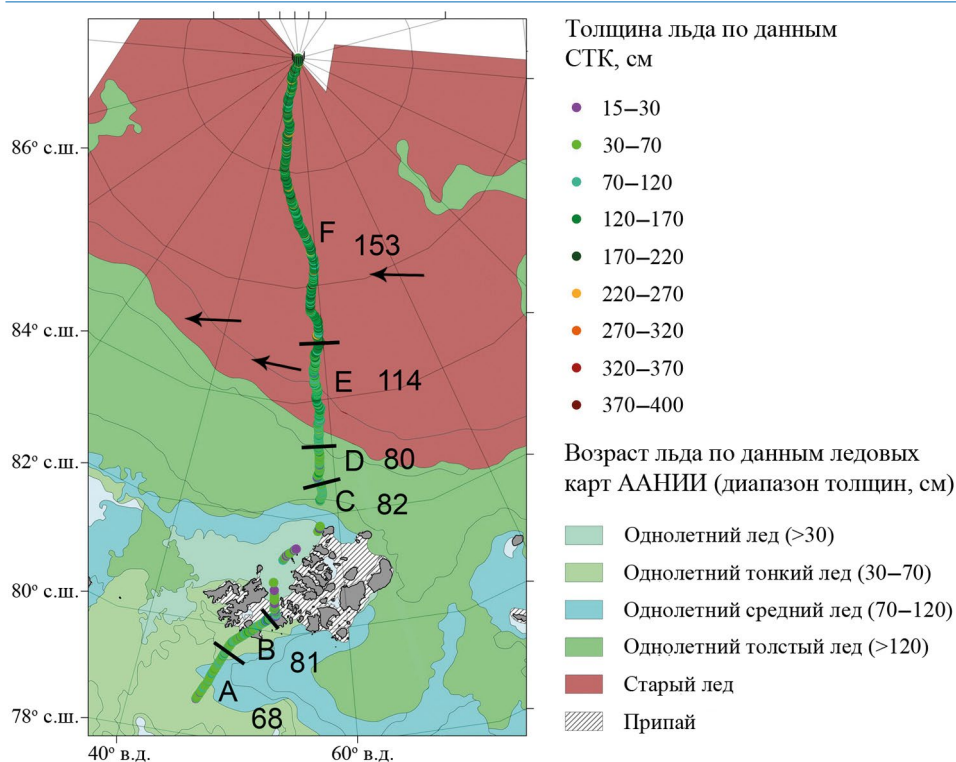


Рис. 8. Сопоставление данных СТК с результатом анализа спутниковых изображений, выполненного ледовыми экспертами ААНИИ.

Спутниковые данные собраны за период с 27 по 29 мая. Данные СТК получены в ходе полюсного рейса атомного ледокола «50 лет Победы» в период с 16 по 20 мая 2018 г. Черной стрелкой указаны величина и направление дрейфа в период с конца мая по середину июня 2018 г.

Fig. 8. Comparison of STC data with an AARI ice chart.

Satellite data was collected for the period of May 27–29, 2018. The data from STC was collected during the nuclear icebreaker “50 Let Pobedy” voyage to the North Pole on June 16–20, 2018

средний лед, а, скорее, смесь однолетнего среднего и тонкого льда, где их приблизительно поровну. Средняя толщина льда в зоне В, согласно данным СТК, была равна 81 см;

– в зоне С, согласно ледовой карте, однолетнего среднего и тонкого льда должно быть примерно поровну. Данные СТК подтверждают правильность этого предположения, показывая эти виды льда со средней толщиной 82 см;

– согласно ледовой карте, в зоне D должно быть значительное преобладание однолетнего толстого льда. Однако данные СТК показывают однолетний тонкий и средний лед с редкими включениями однолетнего толстого. Средняя толщина льда в зоне D, согласно данным СТК, составляла 80 см против предполагаемых >120 см. Таким образом, в зоне D отмечается большое расхождение — 40 см минимум — между результатом экспертного анализа и измерениями СТК;

– в зоне E находится массив двухлетнего льда. Согласно Номенклатуре ВМО по морскому льду, данная возрастная градация не имеет четко определенных пределов толщины. Использование инструмента СТК позволяет получить ее фактические значения. В зоне E толщина двухлетнего льда была около 114 см;

– в зоне F находится массив многолетнего льда. Аналогично двухлетнему льду, старый лед не имеет четко определенных значений толщины. Согласно данным СТК, средняя толщина старого льда в массиве составляла около 153 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе был освещен вопрос необходимости получения оперативных инструментальных данных о толщине ледяного покрова для включения их в число анализируемой информации при создании более качественных ледовых информационных продуктов, являющихся составной частью оперативного гидрометеорологического обеспечения морской деятельности в акватории СМП и других замерзающих морях. Необходимость получения таких данных была показана на примере ледовых карт, составляемых специалистами ледовой информационной системы ААНИИ.

Было показано, что ледовые наблюдения, выполняемые на современных судах, не всегда обладают желаемой степенью надежности. Так, при сравнении оценок толщины льда, полученных от газозовов «Кристоф де Маржери» и «Николай Евгенов» в январе 2021 г. при их следовании друг за другом через акваторию моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, выяснилось, что расхождения в их показаниях достигали 35 см, причем значения толщины попадали в разные возрастные градации льда, что для ледового эксперта существенно.

Подобные разногласия, нередко встречающиеся в оперативной практике, ставят вопрос о необходимости стандартизации измерений ледовых параметров, в частности толщины льда, на пути плавания судов. Предполагается, что технология сбора данных о толщине ледяного покрова с применением автоматизированного комплекса СТМК, разработанного в ААНИИ в 2018 г., позволит стандартизировать измерения и существенно повысить их точность.

На двух примерах сопоставления данных СТК (более ранняя версия СТМК) с ледовыми картами ААНИИ было проиллюстрировано, что поступление информации от СТК в оперативном режиме могло бы повысить точность экспертного анализа спутниковых изображений. Несмотря на то, что экспертные оценки в большинстве своем были корректными, все же отмечались районы, удаленные от берега и от ближайших наблюдательных пунктов, где ошибка дешифрирования достигала минимум 30–40 см. Реперные данные в этих районах отсутствуют на протяжении всего года, поэтому эксперт при составлении ледовой карты, вероятно, помимо прямых дешифровочных признаков льда, ориентировался на собственные знания о ледовом режиме акватории и о том, как развивались метеорологические и ледовые условия в данном районе с момента осеннего ледообразования.

Размещение автоматизированных модулей СТМК на судах обеспечит специалистов ледовой информационной службы необходимыми данными о фактической толщине и других параметрах ледяного покрова непосредственно в районах судоходных трасс, где качество предоставляемой ледовой информационной продукции особенно важно. Также немаловажным является получение информации о фактической ледопроеходимости судов-носителей СТМК относительно текущих условий, что позволит более точно планировать морские операции с участием этих судов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ледовые карты широко используются во всем мире для решения широкого круга как практических, так и научных задач.

С практической точки зрения, на которой в данной работе сконцентрировано больше внимания, ледовые карты являются базовым элементом оперативного гидрометеорологического обеспечения судоходства и других видов морской деятельности. Слово «базовым» означает, что ледовые карты могут выступать не только как конечный информационный продукт, но и как входная информация для создания продуктов более высоких уровней: краткосрочных и долгосрочных ледовых прогнозов, рекомендаций для тактического и стратегического планирования морских операций. С учетом всей перечисленной информационной продукции решаются такие задачи, как: выбор оптимального маршрута плавания судна, заблаговременная разработка сценария транзитного плавания в акватории СМП, выбор подходящего полигона для работ на льду, определение дат открытия и закрытия сезона навигации и др. Очевидно, что точность ледовых карт чрезвычайно важна, поскольку ошибки, закладываемые на этапе ее составления, автоматически влекут за собой ошибки на всех последующих уровнях гидрометеорологического обеспечения, которые могут быть чреваты большими экономическими потерями для потребителя. Размещение автоматизированных модулей СТМК на судах позволит специалистам ледовой информационной службы получать данные, необходимые для оперативного уточнения результатов своей работы и результирующих карт.

С научной точки зрения ледовые карты довольно часто используются исследователями, занимающимися разработкой автоматизированных алгоритмов определения характеристик ледяного покрова по данным спутниковой съемки [19–25]. Ледовые карты используются на этапе валидации алгоритмов, выступая в качестве эталона. Кроме того, многолетний архив ледовых карт анализируется авторами в различных климатических исследованиях [26–31]. Результат этих исследований зависит, в том числе, от качества ледовых карт, предоставляемых той или иной ледовой информационной службой.

Как видно, в высоком качестве ледовой информационной продукции заинтересован очень широкий круг потребителей.

Регулярность и широкий пространственный охват сети натурных наблюдений напрямую способствуют повышению точности ледовых карт и всей системы оперативного гидрометеорологического обеспечения как единого целого.

В настоящее время растущее число судов, способных круглый год курсировать вдоль трассы СМП и регулярно предоставлять оперативные данные о метеорологической и ледовой обстановке, является единственной доступной по экономическим причинам инфраструктурой, пригодной для организации распределенной сети оперативного мониторинга ледовой и метеорологической обстановки на трассе СМП и в прилегающих районах. Установка автоматизированных модулей СТМК на судах позволит получать надежные и достоверные данные.

Возвращаясь к вопросу о разработке автоматизированных алгоритмов определения характеристик льда по данным спутниковой съемки, затронутому чуть ранее, уместно будет добавить в заключение, что ледовые службы мира в настоящее время очень заинтересованы во внедрении автоматизированных методик в свою работу. В частности, большой интерес вызывает решение проблемы автоматического определения возрастных характеристик и толщины ледяного покрова. Важным этапом разработки любого алгоритма является его валидация, для которой, в идеале, необходимо большое количество натурных подспутниковых измерений (именно по

причине дефицита таких данных исследователи пользуются ледовыми картами для валидации). С этой точки зрения развитие сети натурных наблюдений СТМК приобретает еще большую актуальность.

Конфликт интересов. Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках НИТР НИУ Росгидромета на 2021–2024 гг. по теме 5.1.2. Развитие существующих и разработка новых методов и технологий долгосрочного (месячного и сезонного) прогнозирования элементов ледово-гидрологического режима арктических морей, низовьев и устьевых областей рек в условиях климатических изменений. Анализ спутниковых данных выполнялся в рамках темы «Мониторинг» гос. регистрация № 122042500031-8 (Е.В. Афанасьева, Т.А. Алексеева).

Благодарности. В работе использовались ледовые карты, составленные в Центре ледовой и гидрометеорологической информации (ЦЛГМИ) ААНИИ, и спутниковые данные, полученные с помощью спутниковой наземной станции Российской научной экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) ААНИИ.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The analysis of satellite data was carried out within the framework of the topic “Monitoring”, state registration no. 122042500031-8 (E.V. Afanasyeva, T.A. Alekseeva).

Acknowledgements. The authors used ice charts prepared by ice experts from the Center of Ice and Hydrometeorological Information, AARI, and satellite imagery received by ground station of the Russian Scientific Expedition on Svalbard, AARI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева Е.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Демчев Д.М., Чуфарова М.С., Быченков Ю.Д., Девятаев О.С. Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 5–20. doi: 10.24411/2658-4255-2019-10071.
2. Cryo. Automatic Sea Ice Analysis. URL: <https://cryo.met.no/en/automatic-sea-ice-analysis> (дата обращения 05.05.2022).
3. Cheng A., Casati B., Tivy A., Zagon T., Lemieux J.-F., Tremblay L.B. Accuracy and inter-analyst agreement of visually estimated sea ice concentrations in Canadian Ice Service ice charts using single-polarization RADARSAT-2 // The Cryosphere. 2020. № 14. P. 1289–1310. doi: 10.5194/tc-14-1289-2020.
4. Патент № 70983 Российская Федерация, МПК G01C 13/00 (2006.01), G01W 1/00 (2006.01). Устройство для измерения толщины льдин с борта судна / Клейн А.Э., Третьяков В.Ю., Фролов С.В.; заявитель и патентообладатель ГУ ААНИИ — № 2007142411; заявл.: 16.11.2007; опубл. 20.02.2008, Бюл. № 5.
5. Фролов С.В., Клейн А.Э., Третьяков В.Ю. Результаты использования цифрового телевизионного комплекса для измерения толщины льда в Арктическом бассейне в 2004–2005 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 123–127.
6. Сероветников С.С., Фролов С.В., Клейн А.Э. Судовой телевизионный комплекс — реализация автоматизированной системы натурных измерений толщины морского льда // Российская Арктика. 2018. № 2. С. 41–55. doi: 10.24411/2658-4255-2018-00017.
7. Патент № 2767293 Российская Федерация, МПК G01B 11/06 (2006.01), G01B 11/06 (2022.02). Судовой измеритель толщины льда / Сероветников С.С., Ковчин И.М.; заявитель и патентообладатель ООО «НПО Аквастандарт». — № 2021114064; заявл. 18.05.2021; опубл. 17.03.2022, Бюл. № 8.
8. Sea-ice information services in the world. WMO № 574. Geneva, 2019.

9. Sea ice nomenclature. WMO № 259, V. 1 — Terminology and codes. Geneva, 2017.
10. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под ред. Смирнова В. Г. СПб.: ААНИИ, 2011. 240 с.
11. Johannessen O.M., Sandven S., Dalen Ø., Kloster K., Lundhaug M., Hamre T., Melentyev V.V., Alexandrov V., Bogdanov A., Babich N.I. SAR Sea Ice Interpretation Guide. NERSC Technical Report № 227. Bergen: NERSC, 2006. 104 p.
12. Shokr M., Sinha N.K. Sea Ice: Physics and Remote Sensing. New Jersey: Wiley, 2015. 624 p.
13. Постановление Правительства РФ от 18 сентября 2020 г. № 1487 «Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути». URL: <https://base.garant.ru/74664152/> (дата обращения 16.05.2022)
14. Руководство по гидрометеорологическому обеспечению морской деятельности. РД 52.27.881-2019. М.: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019. 132 с.
15. Атлас ледяных образований / Под ред. В.М. Смоляницкого. СПб.: ААНИИ, 2019. 232 с.
16. Шаронов А.Ю., Шматков В.А. Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. № 10 (1). С. 170–182. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
17. Фролов С.В., Третьяков В.Ю., Клейн А.Э., Алексеева Т.А. Новые данные о толщине льда и ее изменчивости в Арктическом бассейне в 2006–2009 годах // Лед и снег. 2011. № 3 (115). С. 99–104.
18. Sea Ice Denmark. URL: <http://seaice.dk/> (дата обращения 05.05.2022).
19. Similä M., Mäkyinen M., Cheng B., Rinne E. Multisensor data and thermodynamic sea-ice model based sea-ice thickness chart with application to the Kara Sea, Arctic Russia // Annals of Glaciology. 2013. № 54 (62). P. 241–252. doi:10.3189/2013AoG62A163.
20. Zakhvatkina N.Yu., Alexandrov V.Yu., Johannessen O.M., Sandven S., Frolov I.Ye. Classification of Sea Ice Types in ENVISAT Synthetic Aperture Radar Images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. № 51 (5). P. 2587–2600. doi: 10.1109/TGRS.2012.2212445.
21. Zakhvatkina N.Yu., Bychkova I.A. Bayesian Classification of the Ice Cover of the Arctic Seas // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. № 51 (9). P. 883–888. doi: 10.1134/S0001433815090212.
22. Rinne E., Similä M. Utilisation of CryoSat-2 SAR altimeter in operational ice charting // The Cryosphere. 2016. № 10. P. 121–131. doi: 10.5194/tc-10-121-2016.
23. Mäkyinen M., Karvonen J. MODIS Sea Ice Thickness and Open Water–Sea Ice Charts over the Barents and Kara Seas for Development and Validation of Sea Ice Products from Microwave Sensor Data // Remote Sensing. 2017. № 9. 1324. doi:10.3390/rs9121324.
24. Заболотских Е.В., Хворостовский К.С., Балашова Е.А., Костылев А.И., Кудрявцев В.Н. О возможности идентификации крупномасштабных областей восторщенного льда в Арктике по данным скаттерометра ASCAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. № 17 (3). С. 165–177. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-165-177.
25. Karvonen J., Rinne E., Sallila H., Uotila P., Mäkyinen M. Kara and Barents sea ice thickness estimation based on CryoSat-2 radar altimeter and Sentinel-1 dual-polarized synthetic aperture radar // The Cryosphere. 2022. № 16. P. 1821–1844. doi: 10.5194/tc-16-1821-2022.
26. Mahoney A.R., Barry R.G., Smolyanitsky V., Fetterer F. Observed sea ice extent in the Russian Arctic, 1933–2006 // Journal of Geophysical Research. 2008. №113. C11005. doi:10.1029/2008JC004830.
27. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.

28. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
29. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Сезонные изменения возрастного состава льдов в северо-восточной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 4 (110). С. 41–50.
30. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Формирование возрастного состава льда в юго-западной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3 (113). С. 16–26. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26.
31. Хотченков С.В. Формирование возрастного состава ледяного покрова в море Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4 (114). С. 5–15. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-4-5-15.

REFERENCES

1. Afanas'eva E.V., Alekseeva T.A., Sokolova Iu.V., Demchev D.M., Chufarova M.S., Bychenkov Iu.D., Deviatayev O.S. AARI methodology for sea ice charts composition. *Rossiiskaia Arktika*. Russian Arctic. 2019, 7: 5–20. doi: 10.24411/2658-4255-2019-10071. [In Russian].
2. Cryo. Automatic Sea Ice Analysis. Available at: <https://cryo.met.no/en/automatic-sea-ice-analysis> (accessed 05.05.2022).
3. Cheng A., Casati B., Tivy A., Zagon T., Lemieux J.-F., Tremblay L.B. Accuracy and inter-analyst agreement of visually estimated sea ice concentrations in Canadian Ice Service ice charts using single-polarization RADARSAT-2. *The Cryosphere*. 2020, 14: 1289–1310. doi: 10.5194/tc-14-1289-2020.
4. Klein A.E., Tret'yakov V.Iu., Frolov S.V. *Ustroistvo dlia izmereniia tolshchiny l'din s borta sudna* (Instrument for measuring the thickness of ice floes from the ship's board). Patent RF, no. 70983, 2008. [In Russian].
5. Frolov S.V., Klein A.E., Tret'yakov V.Iu. Results of using a digital TV complex for ice thickness measurements in the Arctic Basin in 2004–2005. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Problems of Arctic and Antarctic. 2007, 75: 123–127. [In Russian].
6. Serovetnikov S.S., Frolov S.V., Klein A.E. Ship-based television complex — the program for automatic sea ice thickness monitoring. *Rossiiskaia Arktika*. Russian Arctic. 2018, 2: 41–55. doi: 10.24411/2658-4255-2018-00017. [In Russian].
7. Serovetnikov S.S., Kovchin I.M. *Sudovoi izmeritel' tolshchiny l'da* (Ship-based ice thickness measurer). Patent RF, no. 2767293, 2022. [In Russian].
8. Sea-ice information services in the world. WMO № 574. Geneva, 2019.
9. Sea ice nomenclature. WMO № 259, V. 1 — Terminology and codes. Geneva, 2017.
10. *Sputnikovye metody opredeleniia kharakteristik ledianogo pokrova morei*. Satellite methods for determining sea ice cover characteristics. Ed. Smirnov V.G. St. Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute, 2011: 240 p. [In Russian].
11. Johannessen O.M., Sandven S., Dalen Ø., Kloster K., Lundhaug M., Hamre T., Melentyev V.V., Alexandrov V., Bogdanov A., Babich N.I. SAR Sea Ice Interpretation Guide. NERSC Technical Report № 227. Bergen: NERSC, 2006: 104 p.
12. Shokr M., Sinha N.K. *Sea Ice: Physics and Remote Sensing*. New Jersey: Wiley, 2015: 624 p.
13. *Postanovlenie Pravitel'stva RF 18.09.2020 N 1487 "Ob utverzhdenii Pravil plavaniia v akvatorii Severnogo morskogo puti"* (Decree of the Government of the Russian Federation no. 1487, September 18, 2020 "On approval of the Rules for navigation in the area of the Northern Sea Route"). Available at: <http://www.nsr.ru/files/fileslist/137-ru893-2020.pdf> (accessed 16.05.2022). [In Russian].
14. *Rukovodstvo po gidrometeorologicheskomu obespecheniiu morskoi deiatel'nosti*. Guidance for hydrometeorological support of maritime activities. Roshydromet Guidance document № 52.27.881-2019. Moscow: FGBU "Hydrometcenter of Russia", 2019: 132 p. [In Russian].

15. *Atlas ledianykh obrazovaniy*. Atlas of ice formations. Ed. Smolianitskii V. M. St. Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute, 2019: 232 p. [In Russian].
16. *Sharonov A.Iu., Shmatkov V.A.* The problem of hydrometeorological maintenance of year-round navigation in the East Siberian Sea. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. Bulletin of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2018, 10 (1): 170–182. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182. [In Russian].
17. *Frolov S.V., Tret'akov V.Iu., Klein A.E., Alekseeva T.A.* New data on sea ice thickness and its variability in the Arctic Basin in 2006-2009. *Led i sneg*. Ice and snow. 2011, 3 (115): 99–104. [In Russian].
18. Sea Ice Denmark. Available at: <http://seaice.dk/> (accessed 05.05.2022).
19. *Similä M., Mäkynen M., Cheng B., Rinne E.* Multisensor data and thermodynamic sea-ice model based sea-ice thickness chart with application to the Kara Sea, Arctic Russia. *Annals of Glaciology*. 2013, 54 (62): 241–252. doi:10.3189/2013AoG62A163.
20. *Zakhvatkina N.Yu., Alexandrov V.Yu., Johannessen O.M., Sandven S., Frolov I.Ye.* Classification of Sea Ice Types in ENVISAT Synthetic Aperture Radar Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013, 51 (5): 2587–2600. doi: 10.1109/TGRS.2012.2212445.
21. *Zakhvatkina N.Yu., Bychkova I.A.* Bayesian Classification of the Ice Cover of the Arctic Seas. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015, 51 (9): 883–888. doi: 10.1134/S0001433815090212.
22. *Rinne E., Similä M.* Utilisation of CryoSat-2 SAR altimeter in operational ice charting. *The Cryosphere*. 2016, 10: 121–131. doi: 10.5194/tc-10-121-2016.
23. *Mäkynen M., Karvonen J.* MODIS Sea Ice Thickness and Open Water–Sea Ice Charts over the Barents and Kara Seas for Development and Validation of Sea Ice Products from Microwave Sensor Data. *Remote Sensing*. 2017, 9: 1324. doi:10.3390/rs9121324.
24. *Zabolotskikh E.V., Khvorostovskii K.S., Balashova E.A., Kostylev A.I., Kudriavtsev V.N.* Identification of large-scale sea ice ridge areas in the Arctic using ASCAT data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2020, 17 (3): 165–177. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-165-177. [In Russian].
25. *Karvonen J., Rinne E., Sallila H., Uotila P., Mäkynen M.* Kara and Barents sea ice thickness estimation based on CryoSat-2 radar altimeter and Sentinel-1 dual-polarized synthetic aperture radar. *The Cryosphere*. 2022, 16: 1821–1844. doi: 10.5194/tc-16-1821-2022.
26. *Mahoney A.R., Barry R.G., Smolyanitsky V., Fetterer F.* Observed sea ice extent in the Russian Arctic, 1933–2006. *Journal of Geophysical Research*. 2008, 113: C11005. doi:10.1029/2008JC004830.
27. *Dumanskaia I.O.* *Ledovye usloviia morei evropeiskoi chasti Rossii*. Ice conditions of the seas of the European part of Russia. Moscow; Obninsk: Research Group “Social Sciences”, 2014: 608 p. [In Russian].
28. *Dumanskaia I.O.* *Ledovye usloviia morei aziatskoi chasti Rossii*. Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia. Moscow; Obninsk: Research Group “Social Sciences”, 2017: 640 p. [In Russian].
29. *Karklin V.P., Khotchenkov S.V., Iulin A.V., Smolianitskii V.M.* Seasonal changes in the stages of sea ice development in northeast part of the Kara Sea during the autumn and winter period. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2016, 4 (110): 41–50. [In Russian].
30. *Karklin V.P., Khotchenkov S.V., Iulin A.V., Smolianitskii V.M.* Formation of the stages of sea ice development composition in the south-western part of the Kara Sea during autumn-winter season. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2017, 3 (113): 16–26. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26. [In Russian].
31. *Khotchenkov S.V.* Stages of sea ice development in the Laptev Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2017, 4 (114): 5–15. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-4-5-15. [In Russian].