

УДК 551.467

DOI: 10.24412/2658-4255-2021-4-68-80

Для цитирования:

Е.С. Егорова, Н.А. Филиппов, Т.А. Алексеева, С.С. Сероветников, В.Т. Соколов Судовые наблюдения за ледяным покровом Арктического бассейна в летний сезон 2021 года // Российская Арктика. 2021. № 15. С. 68–80

Получена: 19.11.2021

Принята: 27.12.2021

Опубликована: 28.12.2021



Статья распространяется в полнотекстовом формате на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0

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 (Егорова Е.С., Алексеева Т.А., Сероветников С.С.), а также в рамках темы «Мониторинг» гос. регистрация № 01.20.0.2.00164 (Алексеева Т.А.).

СУДОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ЛЕДЯНЫМ ПОКРОВОМ АРКТИЧЕСКОГО БАСЕЙНА В ЛЕТНИЙ СЕЗОН 2021 ГОДА

Е.С. Егорова¹, Н.А. Филиппов^{1,2}, Т.А. Алексеева^{1,3}, С.С. Сероветников¹, В.Т. Соколов¹

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия

² Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

³ Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва

egorova@aari.ru, nafilippov@aari.ru, taa@aari.ru, sssu@aari.ru, svt@aari.ru

Аннотация: В статье представлены результаты обработки данных судовых ледовых наблюдений, выполненных по маршруту от архипелага Земля Франца-Иосифа до Северного полюса в летний сезон 2021 г. с борта атомного ледокола «50 лет Победы». Показано широтное распределение сплочённости однолетних и старых льдов по маршруту судна в дрейфующих льдах. Получены оценки толщины ровного льда (вне торосистых образований) по данным визуальных наблюдений и инструментальных измерений с помощью СТК — судового телевизионного комплекса.

Ключевые слова: Арктический бассейн, судовые ледовые наблюдения, атомный ледокол «50 лет Победы», толщина морских льдов, сплочённость морских льдов, судовой телевизионный комплекс

THE SHIPBORNE SEA-ICE CONDITION OBSERVATIONS IN THE ARCTIC BASIN DURING THE SUMMER 2021

E.S. Egorova¹, N.A. Filippov^{1,2}, T.A. Alekseeva^{1,3}, S.S. Serovetnikov¹, V.T. Sokolov¹

¹ Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

² The Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg

³ Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Abstract: The paper deals with the results of data processing of the shipborne sea-ice condition observations during the nuclear icebreaker «50 let Pobedy» summer cruises in 2021. The sea-ice observations have been made in Arctic Basin between the Franz Josef Land and the North Pole. The latitudinal distribution of the first-year and old ice concentrations along the ship route is shown. The level ice thickness estimates are obtained from visual and instrumental sea-ice observations via the digital television complex.

Keywords: Arctic Basin, shipborne sea-ice observations, nuclear icebreaker «50 let Pobedy», sea ice thickness, sea ice concentration, digital television complex

Введение

Второго августа 2021 г. в порту города Мурманск завершился второй и последний в этом сезоне туристический рейс атомного ледокола «50 лет Победы» к географической точке Северного полюса. Начиная с 2007 г., прийдя на смену атомным ледоколам «Россия», «Советский Союз» и «Ямал», атомоход регулярно принимает на борт туристов со всего мира. Обычно количество круизов достигает пяти-шести за летний сезон, с середины июня до середины августа. Однако в 2021 г. ввиду сложной эпидемиологической ситуации, вызванной распространением новой коронавирусной инфекции, было организовано только два «атомных» рейса преимущественно для российских туристов: первый круиз состоялся в период с 11 по 21 июля, второй — с 21 июля по 2 августа.

Маршрут ледокола стандартный: из порта Мурманск судно следует через проливы архипелага Земля Франца-Иосифа к Северному полюсу, а затем возвращается в порт через восточную или центральную части архипелага. Путь ледокола между островами архипелага может незначительно меняться в зависимости от ледовой обстановки и выбора мест для кратковременных высадок туристов на берег. На рисунке 1 представлена карта движения судна за минувший сезон.

В настоящее время судовые ледовые наблюдения занимают важное место в вопросе изучения ледяного покрова Северного Ледовитого океана. За периоды 1991–1996 гг., 2006–2013 гг., а также в 2018, 2019 и в 2021 гг. сотрудники Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) принимали активное участие в круизах с целью получения уникальной информации о состоянии льдов на участке от архипелага Земля Франца-Иосифа до Северного полюса. Эти данные представляют особый интерес, поскольку маршрут пересекает западную часть Трансарктического дрейфа, который является одним из основных элементов циркуляции морских льдов в Арктическом бассейне [напр., 1, 2].

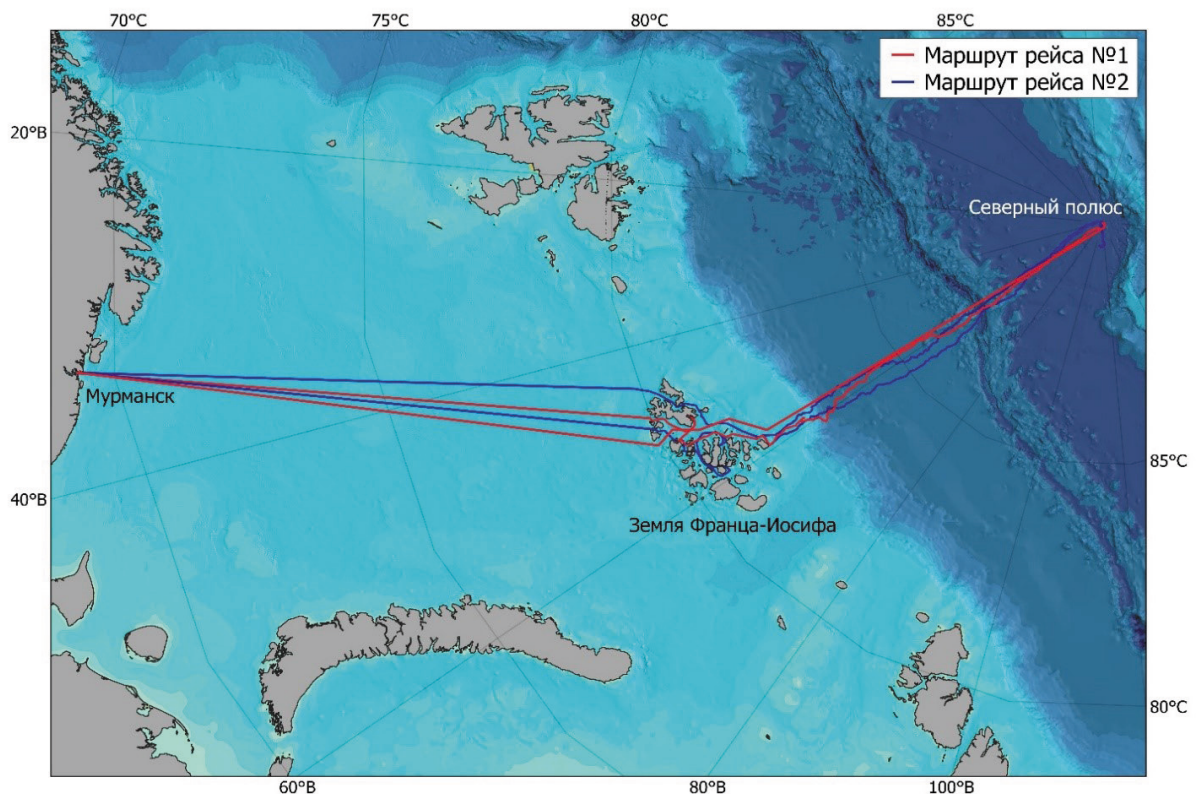


Рисунок 1 — Маршруты атомного ледокола «50 лет Победы» в летний сезон 2021 г.

Накопление данных судовых ледовых наблюдений, выполняемых по стандартному маршруту в летний сезон, и дальнейший их анализ позволяют оценивать происходящие пространственные и временные изменения основных параметров морских льдов в интересующем нас районе Северного Ледовитого океана [3]. Кроме того, получаемые в ходе туристических рейсов сведения об основных характеристиках морских льдов применяются для развития методов ледовых прогнозов и методов определения оптимального маршрута плавания, необходимых при гидрометеорологическом обеспечении плавания судов в Северном Ледовитом океане. Наконец, эти данные могут быть использованы для верификации моделей толщины арктического ледяного покрова (модель PIOMAS [4]) и данных спутниковой альтиметрии (спутников CryoSat-2, Envisat и SMOS [5–6], находящихся в настоящее время на орбите Земли), а также при дешифрировании спутниковых снимков и построении ледовых карт [7].

Методика проведения судовых ледовых наблюдений

Современные наблюдения за ледяным покровом с борта судна подразделяются на визуальные и инструментальные.

Специальные ледовые наблюдения осуществляются визуально с ходового мостика судна на основе методических принципов, разработанных в ААНИИ [8]. Основным принципом выполнения таких наблюдений является выделение однородных ледовых зон, для каждой из которых по району и по пути плавания судна оцениваются характеристики ледяного покрова. Среди определяемых ледовым наблюдателем параметров выделяются следующие: общая сплочённость льдов; частная сплочённость льдов различного возраста и их преобладающие формы; торосистость, разрушенность, сжатие и загрязнённость ледяного покрова; средняя и максимальная высоты торосистых образований; толщина ровного льда и высота снежного покрова; средняя ширина нарушений сплошности льда. В журнале ледовых наблюдений дополнительно фиксируются эксплуатационные показатели автономного движения судна в пределах выделенной однородной ледовой зоны. Попутно ведутся наблюдения за айсбергами, а также за представителями местной фауны: белыми медведями, моржами, тюленями и некоторыми видами птиц.

Инструментальные судовые наблюдения за ледяным покровом производятся при помощи разработанного в ААНИИ судового телевизионного комплекса (СТК) [9]. Ключевая задача комплекса заключается в фотофиксации «выворотов» отдельных льдин вдоль борта ледокола во время его движения в дрейфующих льдах — таким образом СТК регистрирует толщину ровного льда (вне торосистых образований). Полученные после первичной обработки фотоматериалы затем обрабатываются посредством прикладного программного обеспечения, разработанного специалистами института на интегрированной среде приложений Microsoft Visual Basic 6.0. С 2004 г. комплекс успешно применяется для оценки толщины льдов в Арктическом бассейне Северного Ледовитого океана на борту НЭС «Академик Фёдоров» и атомных ледоколов [напр., 3, 10–12].

Ледовые условия плавания в Арктическом бассейне в летний сезон 2021 г.

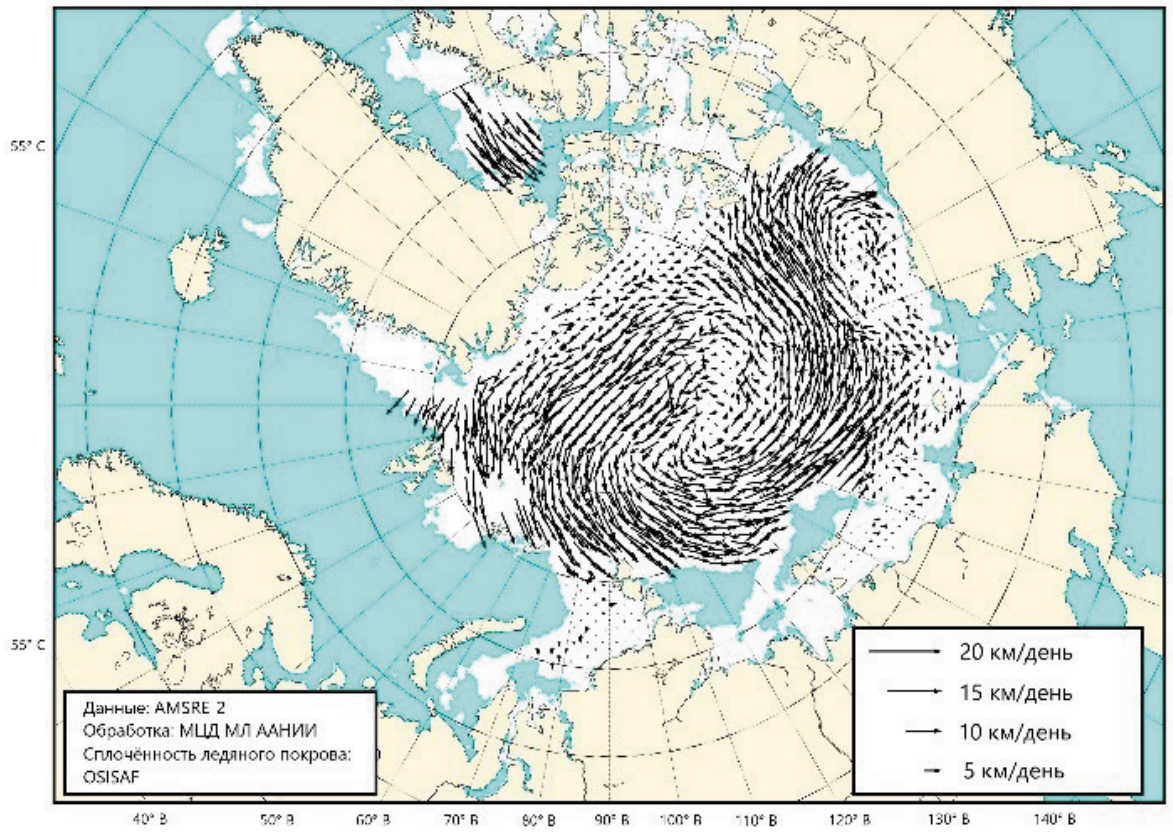
В настоящей работе приводятся результаты обработки данных судовых ледовых наблюдений, которые проводились в период с 11 июля по 2 августа 2021 г. Для общей оценки изменения ледовой обстановки по пути ледокола к Северному полюсу обратимся к обзорным ледовым картам Северного Ледовитого океана ААНИИ [13] на вторую половину июля 2021 г. В летний сезон, с июня по сентябрь, раскраска ледовых карт осуществляется только по общей сплочённости ледяного покрова.

К началу первого рейса, согласно ледовой карте от 11–13 июля, между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа наблюдался язык разреженного льда (сплочённостью 4–6 баллов) протяжённостью до $78,0^\circ$ с.ш., который к концу месяца разрушился в результате летнего таяния и дрейфа льдов. Таким образом, на середину второго круиза, к 25–27 июля, кромка льдов в этой части Баренцева моря сместилась к северу, на $79,5^\circ$ с.ш. По состоянию на 11–13 июля проливы архипелага Земля Франца-Иосифа были заняты льдом как дрейфующим, так и припайным. Однако во втором рейсе, согласно ледовой карте от 25–27 июля, на пути ледокола между островами архипелага хоть и встречались сплочённые льды, их количество существенно уменьшилось по сравнению с ледовой обстановкой на середину месяца. В приполюсном районе в июле 2021 г. преобладали льды сплочённостью 9–10 баллов.

Определение возраста ледяного покрова в летний период по спутниковым данным не представляется возможным, поскольку в результате сезонного таяния льдов появление слоя талой воды затрудняет визуальное различие его основных градаций на снимках во всех диапазонах [7]. Поэтому для приблизительной оценки возрастного состава ледяного покрова на начало первого туристического рейса используем обзорную ледовую карту Северного Ледовитого океана от 23–25 мая 2021 г. [13]. Вдоль $60,0^\circ$ в.д. от архипелага Земля Франца-Иосифа до Северного полюса преобладали однолетние льды толщиной от 30 до 200 см. Основной массив старых льдов концентрировался к северу от $83,0^\circ$ с.ш. и западу от $40,0^\circ$ в.д.; лишь небольшой язык старых льдов отмечался на $85,0^\circ$ с.ш. между $40,0^\circ$ и $57,5^\circ$ в.д.

Поскольку маршрут круизов проходит через Трансарктический дрейф, который следует в генеральном направлении к проливу Фрама, то к июлю кромка старых льдов в районе между архипелагом Земля Франца-Иосифа и Северным полюсом должна была сместиться западнее по сравнению с её положением в конце мая и предположительно не должна пересекать путь ледокола. Похожее расположение границы преобладания старых льдов в исследуемом районе ранее наблюдалось в 2012–2013 и 2015 гг. (см. обзорные ледовые карты в [13]). Однако за короткие интервалы осреднения в исследуемом районе может наблюдаться дрейф ледяного покрова любого направления, не совпадающего с генеральным. Так, на рисунке 2 приведены примеры карт скоростей дрейфа льдов для летнего сезона 2021 г. по данным The Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E) [13], на которых направление его движения не соответствует среднемноголетнему, что теоретически могло привести к смещению массива старых льдов восточнее, до $60,0^\circ$ в.д. — долготы, вдоль которой проходил маршрут судна к Северному полюсу.

a)



б)

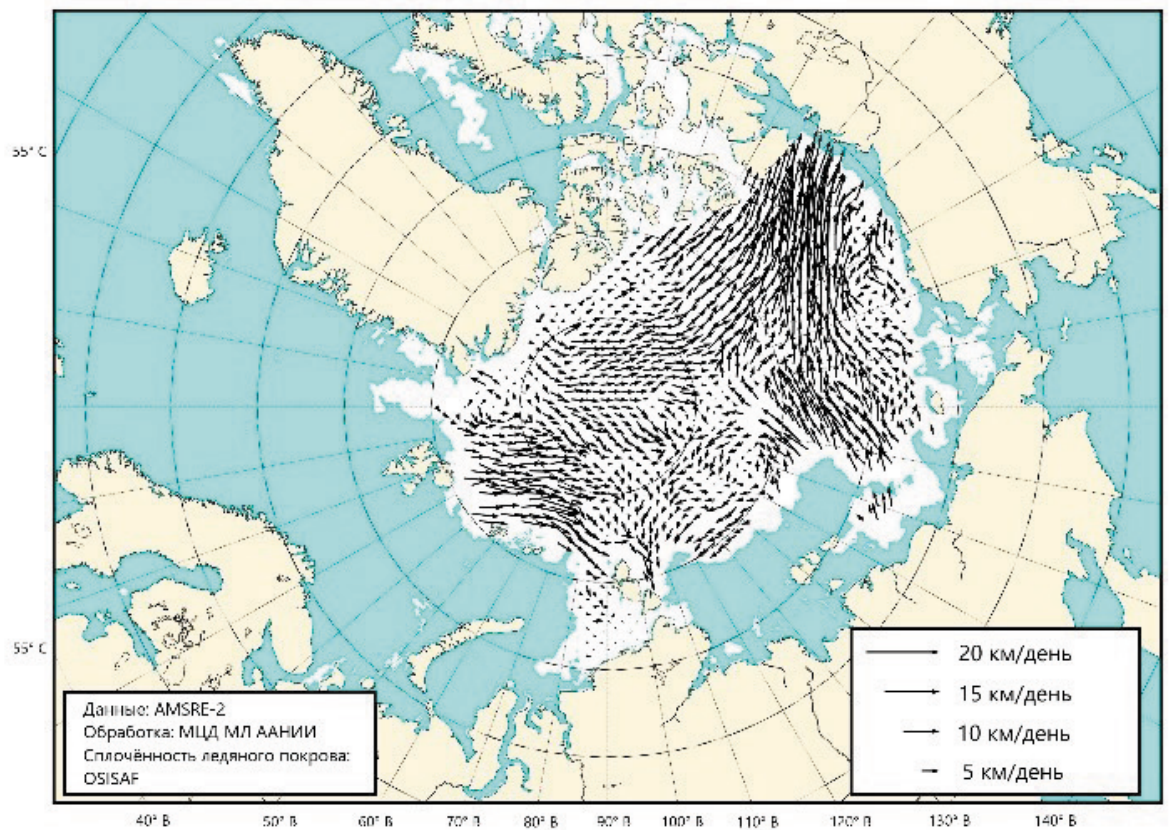


Рисунок 2 — Карты скоростей дрейфа ледяного покрова в Северном Ледовитом океане за периоды: (а) 21–28 июня и (б) 12–19 июля 2021 г. по данным AMSR-E [13].

На рисунке 3 представлено широтное изменение сплочённости од-нолетних и старых льдов по маршруту ледокола к Северному полюсу по данным визуальных наблюдений. В обоих круизах кромка дрейфующих льдов наблюдалась по маршруту судна ещё до достижения им архипелага Земля Франца-Иосифа: на $78,3^\circ$ с.ш. в первом и на $80,0^\circ$ с.ш. во втором рейсе — был зафиксирован наблюдающийся на ледовых картах язык льда, почти разрушившийся к началу второго рейса. Однако ледовые условия плавания в Арктическом бассейне в летний сезон 2021 г. на протяжении обоих круизов можно охарактеризовать как лёгкие.

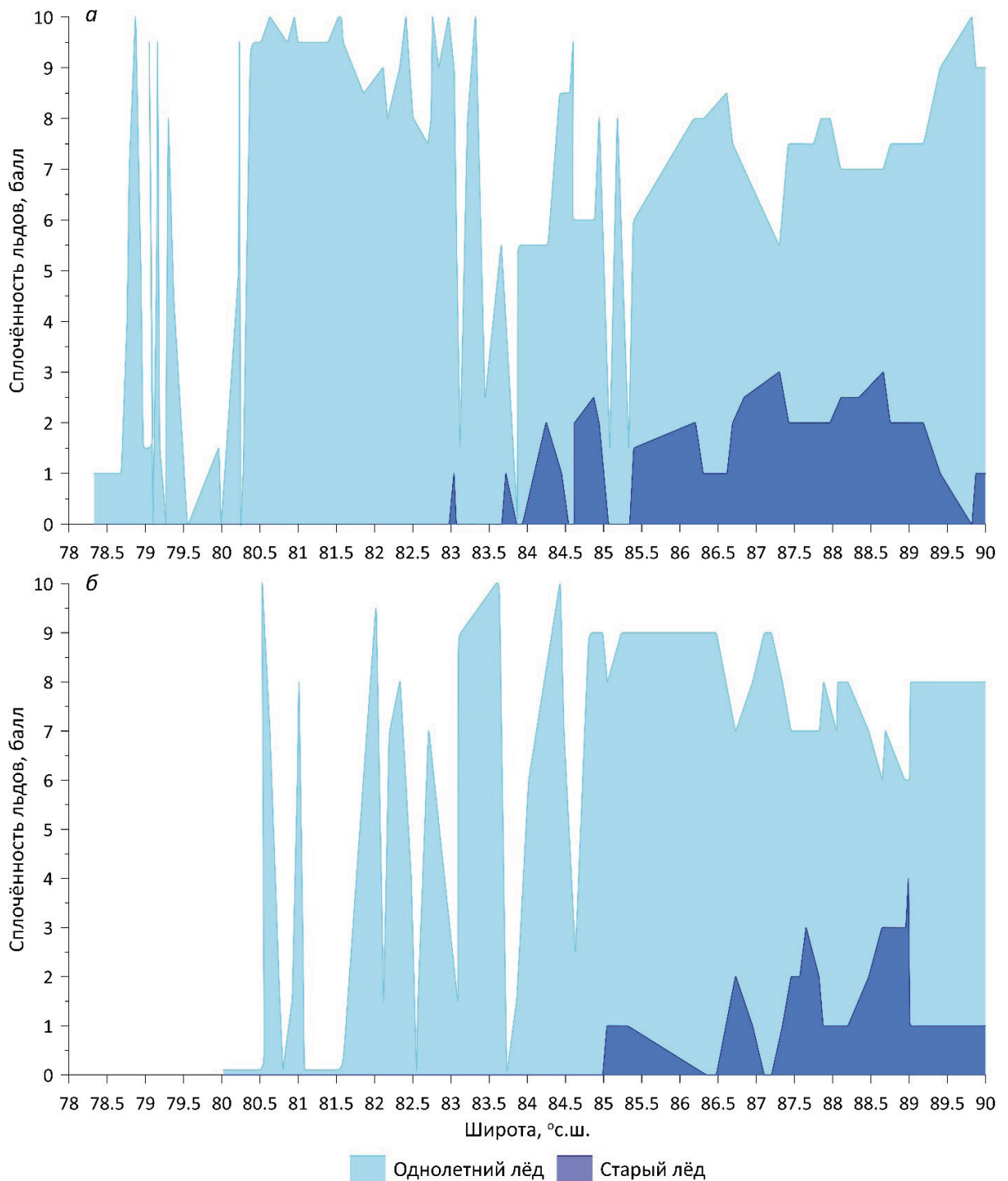


Рисунок 3 — Широтное распределение сплочённости однолетних и старых льдов (в баллах) по пути атомного ледокола «50 лет Победы» до Северного полюса между $45,0^\circ$ и $60,0^\circ$ в.д. в первом (а) и втором (б) рейсах 2021 г. по данным визуальных наблюдений

Отмечались преимущественно однолетние льды; их среднее количество составляло порядка 80 %. В первом рейсе включения старых льдов начали встречаться к северу от 83,7° с.ш., а во втором — несколько севернее, начиная с 85,1° с.ш. На протяжении всего маршрута количество старых льдов не превышало 20 %; во втором круизе была зафиксирована ледовая зона в районе 89,0° с.ш., где количество старых льдов достигло 40 %.

Процентное соотношение однолетних и старых льдов за период визуальных ледовых наблюдений приведено в таблице 1. Относительно периода 2006–2012 гг., ледяной покров в июле 2021 г. характеризовался большим количеством старых льдов, порядка 20 %, наряду с 2013 и 2018 гг. Однако количество старых льдов существенно сократилось по сравнению с 2019 г. (20 % в 2021 г. против 37 % в 2019 г.). Средняя толщина ровного льда в минувший летний сезон также значительно уменьшилась.

Таблица 1

Количество (в %) однолетних и старых льдов в июле по пути судна от северной оконечности архипелага Земля Франца-Иосифа до Северного полюса по данным визуальных наблюдений

Период / год	1991–1996	2006	2007	2008	2009	2010
Однолетний лёд	62	87	96	95	93	90
Старый лёд	38	13	4	5	7	10
Год	2011	2012	2013	2018	2019	2021
Однолетний лёд	93	88	81	80	63	80
Старый лёд	7	12	19	20	37	20

Толщина ровного льда по результатам судовых ледовых наблюдений

Наиболее точным и надёжным способом определения толщины льда в Арктическом бассейне являются данные судовых наблюдений. Поэтому участие в туристических рейсах ледового наблюдателя и выполнение им визуальных и инструментальных наблюдений за толщиной ледяного покрова является важным источником информации. На рисунке 4 показано изменение средней толщины ровного льда (вне торосистых образований) в июле за период судовых визуальных наблюдений в туристических рейсах к Северному полюсу. Средняя толщина ледяного покрова в период 1991–1996 гг. составляла 187 см, а к 2006 г. произошло её значительное сокращение до 160 см, т.е. на 14 %; с 2007 по 2019 гг. средние толщины ровного льда колебались от 105 (в 2012 и 2018 гг.) до 135 см (в 2013 г.). По данным визуальных наблюдений средняя толщина ровного льда в 2021 г. уменьшилась в 2 раза по сравнению с 1991–1996 гг. и составила 95 см, что является минимальной за историю ледовых наблюдений ААНИИ с 1991 г. толщиной, зафиксированной с борта ледокола в исследуемом районе Северного Ледовитого океана. Средняя толщина ровного льда в ходе первого и второго туристического рейса составила 108 и 83 см соответственно.

Сокращение средней толщины ровного льда характерно как для старых, так и для однолетних льдов. Однако в июле степень её сокращения более значима для последних: так, за весь период визуальных наблюдений,

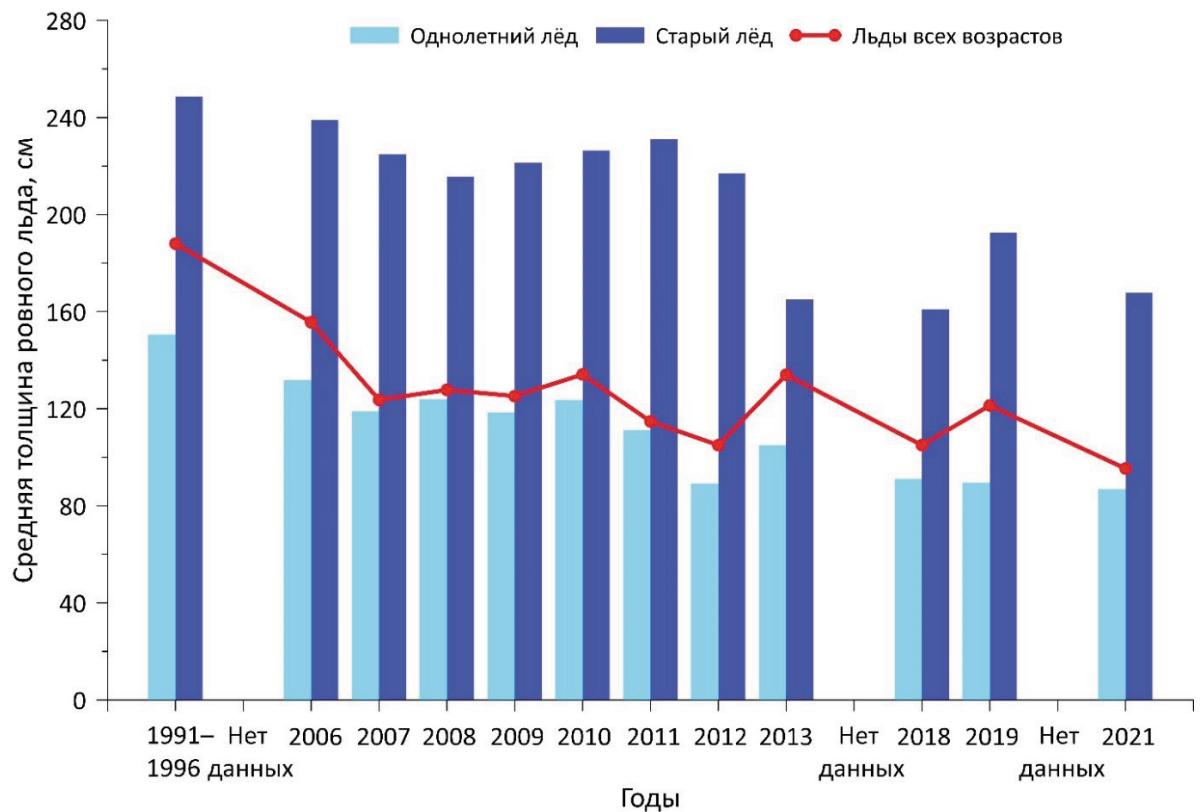


Рисунок 4 — Средняя толщина ровного льда (в см) в июле по пути судна от северной оконечности архипелага Земля Франца-Иосифа до Северного полюса по данным визуальных наблюдений.

с 1991 до 2021 гг., средняя толщина однолетнего ледяного покрова уменьшилась на 42 % (на 65 см), в то время как средняя толщина старых льдов — на 32 % (на 81 см). В 2021 г. средняя толщина однолетних льдов достигла своего наименьшего значения, составив 87 см; средняя же толщина старых льдов, наоборот, увеличилась относительно установленного минимума 2018 г. (168 см в 2021 г. против 161 см в 2018 г.).

Внедрение СТК в практику судовых ледовых наблюдений позволило получать более достоверные и статистически значимые массивы данных по толщине ровного льда на пути ледокола. К основным достоинствами комплекса относятся автоматизация наблюдений, их стандартизация и исключение субъективных факторов на качество получаемых данных, что выгодно отличает инструментальные наблюдения за ледяным покровом от визуальных.

Всего в туристических рейсах в июле 2021 г. выполнено около 14 тыс. измерений толщин ровного льда. На рисунке 5 представлено широтное изменение толщины ледяного покрова по маршруту судна по данным СТК. По мере продвижения ледокола к полюсу наблюдается постепенное увеличение толщины ровного льда: от 80 до 120 см в первом и от 69 до 105 см во втором круизе. Следует отметить, что максимальная толщина ровного льда отмечалась в диапазоне широт 89,1°–89,5° с.ш., составив 126 и 109 см соответственно для первого и второго рейса. Средняя толщина ледяного покрова вне торосистых образований в ходе первого и второго круиза составила 109 и 93 см соответственно. Полученные средние значения инструментальных измерений хорошо согласуются с результатами визуальных наблюдений при допустимой ошибке визуальной регистрации толщины в ± 10 см [9]: так, разница между толщинами ровного льда равна 1 см для первого и 10 см для второго рейса, причём СТК даёт большие величины.

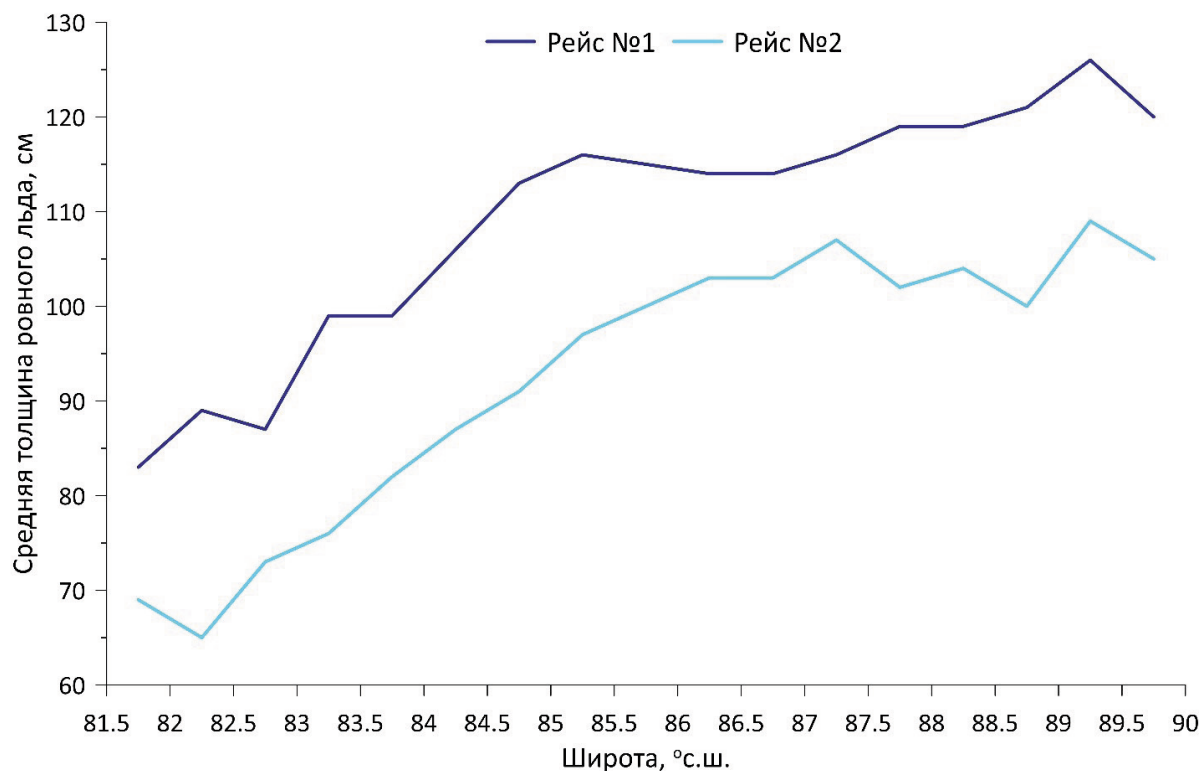


Рисунок 5 — Широтное распределение средней толщины ровного льда (в см) в июле по пути атомного ледокола «50 лет Победы» от северной оконечности архипелага Земля Франца-Иосифа до Северного полюса по данным СТК

Широтное распределение средней толщины ровного льда (в см) в июле по пути атомного ледокола «50 лет Победы» от северной оконечности архипелага Земля Франца-Иосифа до Северного полюса по данным СТК

Рисунок 6 показывает широтное распределение толщины ровного ледяного покрова на пути судна по данным судового комплекса. При движении ледокола между 82,0° и 84,0° с.ш. в ходе первого круиза чаще всего наблюдались льды толщиной 60–80 см (30 %) и 80–100 см (30 %), в ходе второго — 60–80 см (32 %) и 40–60 см (29 %). Движение судна в широтах 84,0°–86,0° с.ш. в первом туристическом рейсе осуществлялось во льдах толщиной 100–120 см (31 %) и 120–140 см (28 %), а во втором — в более тонких льдах 80–100 см (33 %) и 60–80 см (25 %). Наиболее повторяющиеся толщины ровного льда на протяжении плавания судна между 86,0° и точкой Северного полюса распределились следующим образом: в ходе первого рейса преобладали льды 120–140 см (32 % и 31 % для диапазонов 86,0°–88,0° с.ш. и 88,0°–90,0° с.ш. здесь и далее соответственно) и 100–120 см (28 % и 29 % соответственно), в ходе второго — 80–100 см (29 % и 31 % соответственно) и 100–120 см (30 % и 28 % соответственно).

Следует отметить, что малая повторяемость льдов толщиной от 20 до 40 см (не более 4 %) объясняется спецификой эксплуатации СТК. Такие тонкие льды при взаимодействии с судном не встают на «ребро» параллельно его корпусу, а сдвигаются им в сторону, что не позволяет камере зарегистрировать толщину. Кроме того, повторяемость толщин ровного льда более 300 см, полученных при обработке данных комплекса, составила существенно меньше 1 % (всего 2 случая: 84,0°–86,0° с.ш., первый рейс, 345 см; и 86,0°–88,0° с.ш., второй рейс, 365 см), поэтому она не приведена на итоговом графике распределения (рисунок 6).

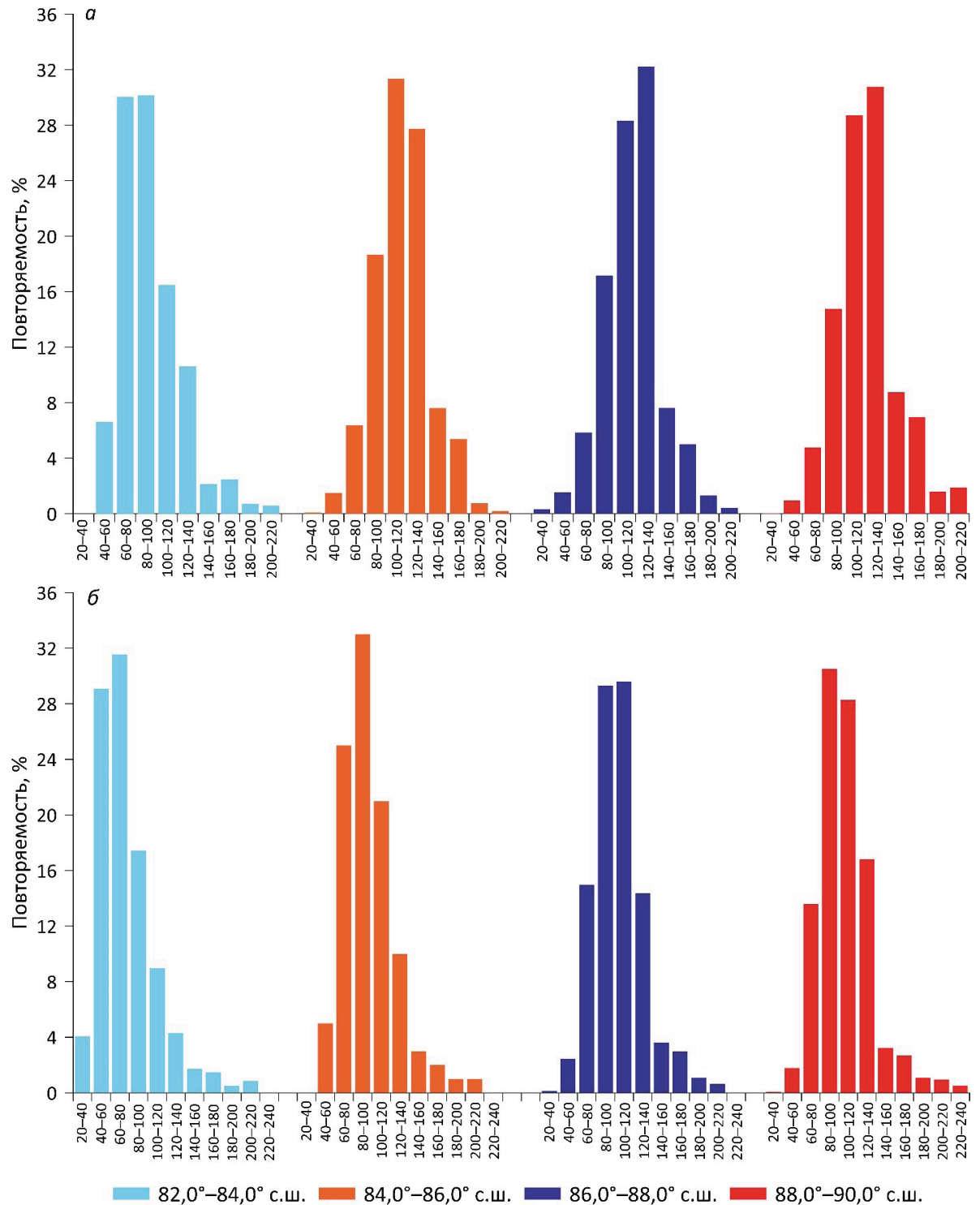


Рисунок 6 — Распределение толщин ровного льда в июле по пути атомного ледокола «50 лет Победы» от северной оконечности архипелага Земля Франца-Иосифа до Северного полюса в первом (а) и втором (б) рейсах 2021 г. по данным СТК.

Заключение

В период туристических рейсов к географической точке Северного полюса на борту атомного ледокола «50 лет Победы» в июле 2021 г. были получены уникальные данные о состоянии ледяного покрова Арктического бассейна, включая толщину ровного льда (вне торосистых образований) и распределение возрастного состава льдов. Систематизация данных судовых ледовых наблюдений, накопленных за годы круизов по

традиционному маршруту в течение летнего периода, позволяют оценить межгодовые и пространственные изменения основных параметров морских льдов Северного Ледовитого океана. Регулярное участие сотрудников ААНИИ в рейсах на борту атомных ледоколов к Северному полюсу даёт уникальную возможность для решения ряда научных задач, связанных с динамикой морских льдов и климатическими изменениями в Арктике.

В летний сезон 2021 г. ледовые условия плавания в Арктическом бассейне Северного Ледовитого океана характеризовались как лёгкие. За всю историю визуальных ледовых наблюдений ААНИИ в исследуемом районе в 2021 г. была зарегистрирована минимальная толщина ровного льда, которая составляет 95 см. С 1991 г. толщина ровного льда в среднем сократилась на 92 см; при этом толщина однолетних льдов уменьшилась на 65 см, а старых — на 81 см. Кроме того, результаты инструментальных измерений средней толщины ровного льда, полученных с помощью СТК, хорошо согласуются с данными визуальных наблюдений при допустимой ошибке визуальной регистрации толщины в ± 10 см. Представленные в настоящей статье результаты коррелируют с другими оценками изменения толщины морских льдов и его возрастного состава, полученных по данным спутниковой альтиметрии [напр., 14–16].

Список литературы:

1. Волков В.А., Мушта В.А., Демчев Д.М., Коржиков А.Я., Сандвен С. Связь крупномасштабной изменчивости поля дрейфа льда в Северном Ледовитом океане с климатическими изменениями общей ледовитости, происходящими в течение последних десятилетий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. №2. С. 50–63.
2. Волков В.А., Мушта В.А., Демчев Д.М. Закономерности изменения крупномасштабной структуры поля дрейфа морского льда в Северном Ледовитом океане (на основе спутниковых данных 1978–2017 гг.) // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488. №4. С. 437–439. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524884439-442>.
3. Алексеева Т.А., Сероветников С.С., Фролов С.В., Соколов В.Т. Ледовые условия плавания в Арктическом бассейне в летний период 2018 года // Российская Арктика. 2018. № 2. С. 31–40.
4. Zhang J.L., Rothrock D.A. Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates // Monthly Weather Review. 2003. Vol. 131. P. 845–861. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0845:MCSIWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0845:MCSIWA>2.0.CO;2).
5. Tilling R., Ridout A., Shepherd A. Assessing the Impact of Lead and Floe Sampling on Arctic Sea Ice Thickness Estimates from Envisat and CryoSat-2 // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124. No. 11. P. 7473–7485. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JC015232>.
6. Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C. A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data // The Cryosphere. 2017. Vol. 11. P. 1607–1623. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-11-1607-2017>.
7. 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.
8. Руководство по производству судовых специальных ледовых наблюдений. СПб.: ААНИИ, 2011. 211 с.
9. Сероветников С.С., Фролов С.В., Клейн А.Э. Судовой телевизионный комплекс – реализация автоматизированной системы натуральных измерений толщины морского льда // Российская Арктика. 2018. №2. С. 41–55. DOI: <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00017>.
10. Фролов С. В., Третьяков В. Ю., Клейн А. Э., Алексеева Т. А. Толщина льда и её изменчивость в Арктическом бассейне в 2006–2009 гг. // Лёд и снег. 2011. Т. 3. № 115. С. 99–104.
11. 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.
12. Фролов С.В., Федяков В.Е., Третьяков В.Ю., Клейн А.Э., Алексеев Г.В. Новые данные об изменении толщины льда в Арктическом бассейне // Доклады Академии наук. 2009. Т. 425. № 1. С. 104–108.
 13. Мировой центр данных по морскому льду. URL: <http://wdc.aari.ru> (дата обращения 25.11.2021).
 14. Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018) // *Environmental Research Letters*. 2018. Vol. 13. No. 10. 105005. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae3ec>.
 15. Gascard J.-C., Zhang J., Rafizadeh M. Rapid decline of Arctic sea ice volume: Causes and consequences // *The Cryosphere Discussions*. 2019. [preprint]. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-2019-2>.
 16. Laxon S.W., Giles K.A., Ridout A.L., Wingham D.J., Willatt R., Cullen R., Kwok R. Schweiger A., Zhang J., Haas C., Hendricks S., Krishfield R., Kurtz N., Farrell S., Davidson M. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40. No. 4. P. 7372–7377. DOI: <https://doi.org/10.1002/grl.50193>.

References:

1. Volkov V.A., Mushta V.A., Demchev D.M., Korzhikov A.YA., Sandven S. Svyaz' krupnomasshtabnoj izmenchivosti polya drejfa l'da v Severnom Ledovitom okeane s klimaticheskimi izmeneniyami obshchej ledovitosti, proiskhodyashchimi v techenie poslednih desyatiletij [Relation of large-scale variations of the sea ice drift fields in the Arctic Ocean with climatic changes of total ice concentrations during last decades]. *Problemy Arktiki i Antarktiki – Arctic and Antarctic Research*, 2016, no. 2, pp. 50–63. (In Russian).
2. Volkov V.A., Mushta A.V., Demchev D.M. Zakonomernosti izmeneniya krupnomasshtabnoj struktury polya drejfa morskogo l'da v Severnom Ledovitom okeane (na osnove sputnikovyh dannyh 1978–2017 gg.) [Regularities of the variability of large-scale sea ice drift structures in the Arctic Ocean (based on satellite data 1978–2017)]. *Doklady Akademii nauk – Proceedings of the Academy of Sciences*, 2019, vol. 488, no. 4, pp. 437–439. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524884439-442>.
3. Alekseeva T.A., Serovetnikov S.S., Frolov S.V., Sokolov V.T. Ledovye usloviya plavaniya v Arkticheskom bassejne v letnij period 2018 goda [Ice conditions of navigation in the Arctic Basin in summer 2018]. *Rossijskaya Arktika – Russian Arctic*, 2018, no. 2, pp. 31–40. (In Russian).
4. Zhang J.L., Rothrock D.A. Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates. *Monthly Weather Review*, 2003. vol. 131, pp. 845–861. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0845:MGSIIWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0845:MGSIIWA>2.0.CO;2).
5. Tilling R., Ridout A., Shepherd A. Assessing the Impact of Lead and Floe Sampling on Arctic Sea Ice Thickness Estimates from Envisat and CryoSat-2. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, vol. 124, no. 11, pp. 7473–7485. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JC015232>.
6. Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C. A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data. *The Cryosphere*, 2017, vol. 11, pp. 1607–1623. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-11-1607-2017>.
7. Afanas'eva E.V., Alekseeva T.A., Sokolova YU.V., Demchev D.M., CHufarova M.S., Bychenkov YU. D, Devyataev O.S. Metodika sostavleniya ledovyh kart AANII [AARI methodology for sea ice charts composition]. *Rossijskaya Arktika – Russian Arctic*, 2019, no. 7, pp. 5–20. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10071>.
8. Rukovodstvo po proizvodstvu sudovyh special'nyh ledovyh nablyudenij [Guidelines for the production of shipboard special ice observations]. St. Petersburg, AANII Publ., 2011, 211 p. (In Russian).
9. Serovetnikov S.S., Frolov S.V., Klejn A.E. Sudovoj televizionnyj kompleks – realizaciya avtomatizirovannoj sistemy naturnyh izmerenij tolshchiny morskogo l'da [Ship-based television complex – the program for automatic sea ice thickness monitoring]. *Rossijskaya Arktika – Russian Arctic*, 2018, no. 2, pp. 41–55. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00017>.
10. Frolov S. V., Tret'yakov V. YU., Klejn A. E., Alekseeva T. A. Tolshchina l'da i eyo izmenchivost' v Arkticheskom bassejne v 2006–2009 gg. [Ice thickness and its variability in the Arctic Basin in 2006–2009]. *Lyod i sneg – Ice and Snow*, 2011, vol. 3, no. 115, pp. 99–104. (In Russian).
11. Frolov S.V., Klejn A.E., Tret'yakov V.YU. Rezul'taty ispol'zovaniya cifrovogo televizionnogo

- kompleksa dlya izmereniya tolshchiny l'da v Arkticheskom bassejne v 2004–2005 gg. [Results of using a digital TV complex for ice thickness measurements in the Arctic Basin in 2004–2005]. Problemy Arktiki i Antarktiki – Arctic and Antarctic Research, 2007, № 75, pp. 123–127. (In Russian).
12. Frolov S.V., Fedyakov V.E., Tret'yakov V.YU., Klejn A.E., Alekseev G.V. Novye dannye ob izmenenii tolshchiny l'da v Arkticheskom bassejne [New data on changes in ice thickness in the Arctic basin]. Doklady Akademii nauk – Proceedings of the Academy of Sciences – 2009, vol. 425, no. 1, pp. 104–108. (In Russian).
 13. World Data Center Sea Ice file server. Available at: <http://wdc.aari.ru> (accessed 25.11.2021).
 14. Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018). Environmental Research Letters, 2018, vol. 13, № 10, 105005. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae3ec>.
 15. Gascard J.-C., Zhang J., Rafizadeh M. Rapid decline of Arctic sea ice volume: Causes and consequences. The Cryosphere Discussions, 2019. [preprint]. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-2019-2>.
 16. Laxon S.W., Giles K.A., Ridout A.L., Wingham D.J., Willatt R., Cullen R., Kwok R. Schweiger A., Zhang J., Haas C., Hendricks S., Krishfield R., Kurtz N., Farrell S., Davidson M. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume. Geophysical Research Letters, 2013, vol. 40, no. 4, pp. 7372–7377. DOI: <https://doi.org/10.1002/grl.50193>.