ISSN (Online): 2658-4255
RUSSIAN-ARCTIC.INFO
7 / 2019

Российская Арктика

МОРСКОЙ ЛЕД

16+

РОССИЙСКАЯ АРКТИКА
НАУЧНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ ЖУРНАЛ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР: К.А. Змиева, к.т.н.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
Nikolay Koldunov, PhD (Bremen, Germany)
С.В. Кокин, PhD (Хабрин, Китай)
В.А. Гаврилов, д.в.н. (Москва, Россия)
С.А. Горбанев, д.м.н. (Санкт-Петербург, Россия)
Ю.В. Зворыкина, д.э.н. (Москва, Россия)
Е.В. Кудряшова, д.ф.н., проф. (Архангельск, Россия)
С.В. Левыкин, д.г.н., проф. (Екатеринбург, Россия)
Е.Г. Митина, д.п.н., к.б.н. (Мурманск, Россия)
Д.В. Никущенко, д.т.н. (Санкт-Петербург, Россия)
Е.Б. Прохорчук, д.б.н., проф. (Москва, Россия)
И.А. Репина, д.ф.-м.н., проф. (Москва, Россия)
В.А. Семенов, д.ф.-м.н. (Москва, Россия)
С.В. Серебрянников, д.т.н., проф. (Москва, Россия)
В.Н. Слободчиков, д.т.н. (Москва, Россия)
В.В. Степанова, д.э.н. (Архангельск, Россия)
Г.А. Туричин, д.т.н., проф. (Санкт-Петербург, Россия)
Н.К. Токаревич, д.м.н. (Санкт-Петербург, Россия)
Б.Ю. Филиппов, д.б.н. (Архангельск, Россия)
Е.У. Миронов, д.г.н. (Санкт-Петербург, Россия)
В.П. Чащин, д.м.н., проф. (Санкт-Петербург, Россия)
А.Ю. Хренников, д.т.н., проф. (Москва, Россия)
Ю.И. Баева, к.б.н. (Москва, Россия)
Ю.В. Карякин, к.г-м.н. (Москва, Россия)
И.А. Климанов, к.м.н. (Москва, Россия)
А.Н. Никанов, к.м.н. (Кировск, Россия)
О.Ю. Салтыкова, к.п.н. (Чебоксары, Россия)
М.С. Хвостова, к.г.н. (Москва, Россия)

НАД ВЫПУСКОМ РАБОТАЛИ:
Научный редактор: Татьяна Алексеева (ААНИИ)
Исполнительный директор: Елена Макова
Ответственный секретарь: Марина Дробышевская
Художественный редактор: Николай Кутузов
Специалист по связям с общественностью: Ольга Чаховская

ПОДАЧА РУКОПИСЕЙ: info@arctic-centre.com
АДРЕС РЕДАКЦИИ: 101000, Москва, Армянский пер., д. 9/1/1, оф. 203
СВИДЕТЕЛЬСТВО о регистрации средства массовой информации: ЭЛ №ФС77-72859 от 22 мая 2018 года.
УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ: ООО «Центр информационного и правового обеспечения развития Арктики»
http://arctic-centre.com
ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР: Ю.В. Беликова
Свидетельство о регистрации: ЭЛ № ФС77-72859 от 22 мая 2018 года

Журнал распространяется по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International
www.creativecommons.org
Дата выпуска: 21.10.2019

СОДЕРЖАНИЕ НОМЕРА

4 Вступительное слово научного редактора

5 **МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ КАРТ ААНИИ**

Е.В. Афанасьева, Т.А. Алексеева, Ю.В. Соколова, Д.М. Демчев, М.С. Чуфарова, Ю.Д. Быченков, О.С. Девятаев

21 **ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЬДА**

С.В. Хотченков, Ю.Г. Гаврилов, М.Ю. Наумов

28 **МЕЖГОДОВАЯ И СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛОЩАДИ ЛЬДОВ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

А.В. Юлин, Н.А. Вязигина, Е.С. Егорова

41 **РЕАЛИЗАЦИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО И ЛОГИСТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ – КАК ВЫПОЛНИТЬ «МАЙСКИЙ» УКАЗ ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ**

Д.О. Фишкин, М.Н. Григорьев

49 **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В ЛЕТНЕЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД**

И.А. Репина, А.Ю. Артамонов, М.И. Варенцов, Е.М. Хавина

Специальный материал

62 **НАШ СЕВЕР: РОЖДЕНИЕ**
И.В. Малинина

НЕОЖИДАННАЯ АРКТИКА
65 Д.Б. Иоффе

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

Т.А. АЛЕКСЕЕВА

Окончила кафедру океанологии факультета географии и геоэкологии СПбГУ.
С 2004 года по настоящее время работает научным сотрудником в Отделе ледового режима и прогнозов Арктического и Антарктического научно-исследовательского института. За 12 лет работы в институте участвовала в 25 научно-исследовательских экспедициях в Балтийском море, в Татарском проливе, в Арктике от Гренландского до Восточно-Сибирского морей, на мысе Барроу на Аляске.

Осенью 2018 года мы выпустили первый тематический номер «Современные методы исследования ледяного покрова в Арктике», в котором опубликовали статьи научных сотрудников ААНИИ, ИФА РАН и ИКИ РАН. Некоторые из них были переведены на английский язык и уже использовались в международных научных исследованиях. Например, своевременно вышла статья «Ледяные дрейфующие острова в Арктике» о поиске подходящих ледяных полей для организации научно-исследовательских дрейфующих станций. Автор статьи В.И. Бессонов на данный момент принимает самое активное участие в международной экспедиции MOSAiC, как опытный ледовый эксперт и информация, опубликованная в статье, по крайней мере, частично проливает свет на методику его работы со спутниковыми снимками.

В журнале «Российская Арктика» такой тематический ежегодный номер уже становится хорошей традицией! Мы завершаем 2019-ый год новым выпуском «Морской лед» с актуальными статьями об исследованиях изменчивости ледяного покрова в Северном Ледовитом океане, о методах изучения морского льда в экспедициях и с помощью спутниковой информации.

А также, в настоящем номере мы открываем новую рубрику об образовании, учебных программах и интересных событиях, связанных с арктическими исследованиями. Эта рубрика для студентов, школьников, дошкольников, и, конечно же, их родителей. Нашими первопроходцами стали сотрудники музея Ледокола «Красин», которые рассказали об удивительных программах обучения детей от пяти лет и старше. Первая программа «Наш Север» стартовала в 2010 году, вторая программа «Легко ли быть «Лидером»?» только недавно появилась на свет и уже имеет большой успех. Занятия проходят прямо на борту ледокола, который пришвартован около набережной Лейтенанта Шмидта в Санкт-Петербурге, откуда открывается вид на Балтийский завод и видны поочередно строящиеся там атомные ледоколы «Арктика», «Сибирь» и «Урал». Таким образом, маленькие «полярники» окунаются в самую гущу событий – сплошное наглядное пособие!

Приятного чтения и новых успехов в наступающем 2020 году!

Научный редактор журнала «Российская Арктика»,
Татьяна Алексеева

УДК 551.467
DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10071

МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ КАРТ ААНИИ

Е.В. Афанасьева[1], Т.А. Алексеева[1], Ю.В. Соколова[1], Д.М. Демчев[1], М.С. Чуфарова[1], Ю.Д. Быченков[1], О.С. Девятаев[1]

[1]Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

✉ *afanasieva@aari.ru, taa@aari.ru, j.sokolova@aari.ru, denis.demchev@aari.ru, chufarova@aari.ru, ydb@aari.ru, osd@aari.ru*

Ледовые карты Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) широко используются для ряда научных и практических задач, однако до сих пор не была опубликована подробная и обобщенная информация о методах их составления. В данной статье сотрудниками центра «Север» ААНИИ, непосредственно занимающимися составлением ледовых карт в настоящее время, описаны особенности методики и используемые для картирования данные. Представленный в статье обзор полезен для корректного применения ледовых карт пользователями для своих научных и практических задач.

Ключевые слова: Арктика, дешифрирование морского льда, морской лед, сплоченность, возраст морского льда, ледовая карта, ААНИИ, ледовый эксперт, ледовая служба.

AARI METHODOLOGY FOR SEA ICE CHARTS COMPOSITION

E.V. Afanasyeva[1], T.A. Alekseeva[1], J.V. Sokolova[1], D.M. Demchev[1], M.S. Chufarova[1], Yu.D. Bychenkov[1], O.S. Devyataev[1]

[1]Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg

Sea ice charts of the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) are widely used nowadays for a variety of scientific and practical tasks. However, detailed description of ice charts composition still has not been published. In this paper, staff members of the Russian Ice Service (Center “Sever”, AARI), directly involved in ice charts composition, give information about sea ice analysis methodology and the data they use. Information presented is necessary for a correct ice charts use for different needs.

Keywords: Arctic, sea ice analysis, sea ice concentration, sea ice age, sea ice chart, AARI, sea ice expert, ice service.

Краткий обзор ледовых служб, занимающихся морями Северного Ледовитого океана (СЛО).

Оперативным мониторингом морского льда на акватории СЛО в настоящее время занимаются ледовые службы пяти приарктических государств: России, Канады, США, Дании и Норвегии [1]. Наблюдения за ледовой обстановкой ведутся круглый год, и на их основе составляются ледовые прогнозы различной заблаговременности.

Информация, предоставляемая ледовыми службами, различается по своему составу и районам. Так, Датский метеорологический институт (DMI – Danish Meteorological Institute) ведёт мониторинг вод вокруг Гренландии, и на ледовые карты наносятся границы зон одинаковой сплочённости, возрастного состава дрейфующего льда, границы припая, а также наличие льда материкового происхождения (айсберги). Норвежский метеорологический институт (MET.NO – Norwegian Meteorological

Institute) отслеживает ледовую обстановку на европейской части СЛО. На ледовых картах отображается только общая сплочённость дрейфующего льда и границы припая. Канадская ледовая служба (CIS – Canadian Ice Service) выпускает ледовые карты своих территориальных вод, расположенных вдоль арктического и северо-восточного побережий Северной Америки, а также в проливах Канадского Арктического архипелага. Карты содержат информацию о сплочённости, возрастном составе дрейфующего льда, а также положении границ припая. Национальный ледовый центр США (NIC – National Ice Center) производит мониторинг всего Северного Ледовитого океана вместе с прилегающими замерзающими акваториями Тихого океана и Северной Атлантики. Региональные ледовые карты вод, омывающих полуостров Аляска, составляются Национальной службой погоды США (NWS – National Weather Service). На картах NIC и NWS указывается сплочённость и возраст льда. Центром «Север» Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) выпускаются ледовые карты морей европейской и амеразийской частей Арктики с указанием общей сплочённости льда в летние месяцы (с июня по сентябрь) и возрастного состава в зимние месяцы (с октября по май). Кроме того, производится картирование ледяного покрова замерзающих морей Тихого океана, а также внутренних морей, граничащих с территорией России. Момент перехода с зимнего режима картирования на летний в этих морях наступает раньше, чем в арктических, что обусловлено более ранним наступлением сезона таяния. Помимо сплочённости и возраста, на картах обозначаются границы припая и некоторые опасные объекты – зоны риска встречи с айсбергами и стамухи. Следует отметить, что помимо ледовых карт, службами Канады, США и Дании также регулярно составляются карты распределения айсбергов в районе Гренландии и Северной Атлантики. Ледовые службы России, США и Норвегии ведут постоянный мониторинг вод не только арктических морей, но и морей Антарктики. Примеры карт, составленных иностранными ледовыми службами, приведены на Рисунке 1. Примеры ледовых карт ААНИИ разных лет будут приведены в следующих разделах.

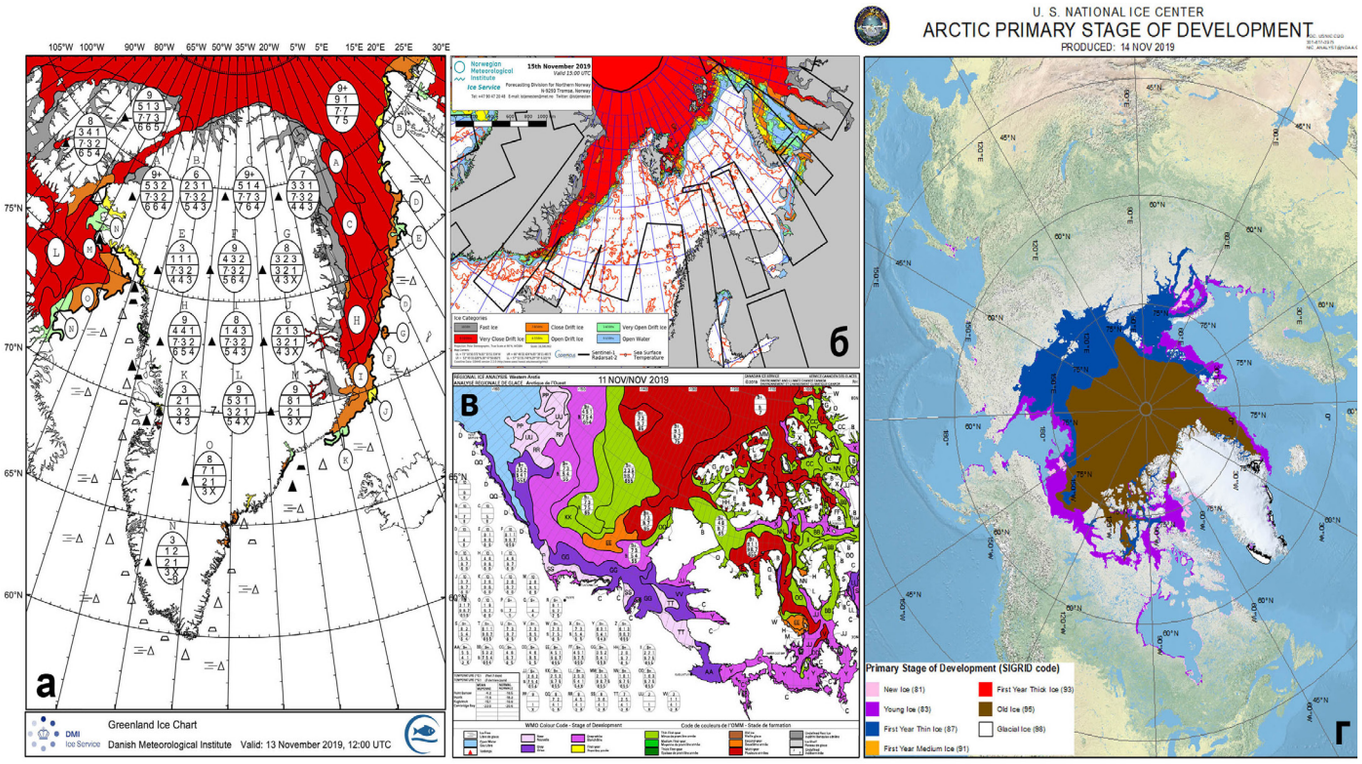

Рисунок 1 – Примеры ледовых карт, составленных ледовыми службами Дании (а) [2], Норвегии (б) [3], Канады (в) [4] и США (г) [5].

История ледового картирования в ААНИИ.

История ледового картирования в ААНИИ берёт начало с середины 20-х годов XX века, когда начались эпизодические ледовые авиаразведки в Арктике. С 1929 г. полёты стали регулярными в Карском море, а с 1935 г. – в море Лаптевых. С 1938 г. пионерский период авиаразведки льдов закончился, и авиационные наблюдения стали выполняться регулярно по всей трассе Северного морского пути (СМП), и не только в навигационный период [6, 7]. В ходе первых авиаразведок данные о состоянии ледяного покрова наносились наблюдателем на бумажный бланк непосредственно на борту во время полёта. На Рисунке 2 представлена карта ледовых условий вблизи берега Харитона Лаптева (Карское море), выполненная во время авиаразведки 9 сентября 1934 г. Видно, что наблюдатель фиксировал только самые общие особенности, такие как положение границы припая и кромки дрейфующего льда, наличие ледяных полей и их общую сплочённость. Наблюдателем отмечена полынья вдоль побережья, за полыньёй - зоны разреженного и сплочённого льда, припай в архипелаге Норденшельда. Следует отметить, что официально признанной символики для ледовых карт в тот ранний период ещё не было, поэтому условные обозначения хоть и понятны, но во многом отличаются от современных.

Позднее, помимо визуальных наблюдений, стали выполняться инструментальные измерения параметров ледяного покрова. Сначала они ограничивались средствами аэрофотосъёмки, а затем с начала 1950-х по 1980 гг. был протестирован и с разным успехом внедрён в практику ряд приборов, включавший в себя панорамные радиолокационные станции, авиационные ИК-радиометры (ИК – инфракрасный диапазон),

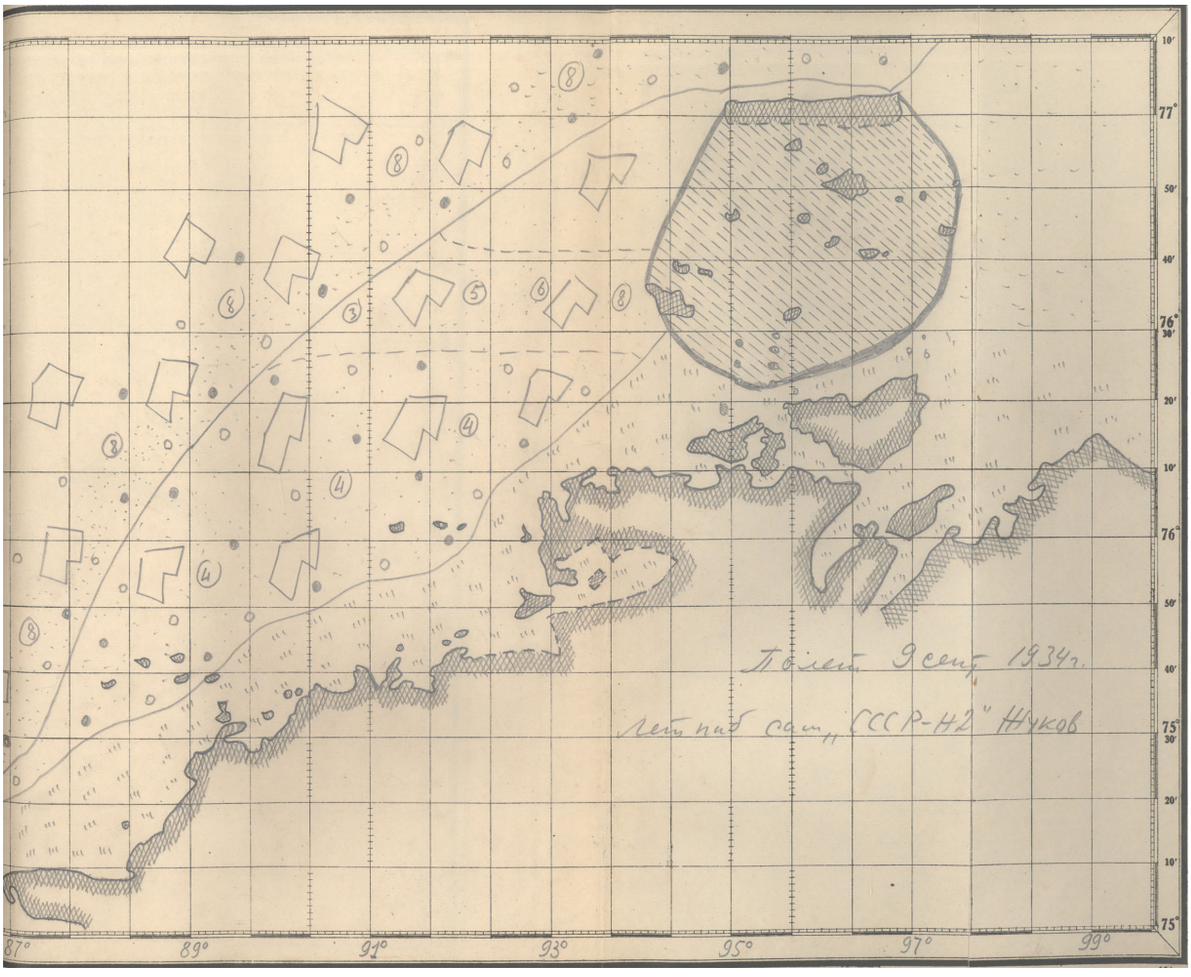

Рисунок 2 – Карта ледовой обстановки вдоль Таймырского побережья между бухтой Михайлова и Таймырским заливом (берег Харитона Лаптева), Карское море. Карта выполнена в ходе ледовой авиаразведки 9 сентября 1934 г. и хранится в фондах ААНИИ.

радиолокационные станции бокового обзора (РЛС БО), радиолокационные измерители толщины льда, лазерные профилографы и СВЧ-радиометры (СВЧ – сверхвысокочастотный диапазон) [8, 9]. Собранные в ходе облётов инструментальные данные использовались ледовыми экспертами для анализа ледовой обстановки. Применение инструментальных методов дало возможность расширить ряд наблюдаемых параметров, что потребовало усовершенствования действовавшей до сих пор классификации морских льдов, принятой в 1954 г. Новая версия номенклатуры [10], которая используется по настоящее время, была утверждена в 1971 г. Это позволило унифицировать обозначение на картах таких характеристик льда как возраст, размер ледяных образований, степень торосистости и наслоенности, стадия таяния, заснеженность, наличие и ориентация трещин и разводий, наличие сжатий, присутствие опасных ледовых объектов и др. Важно отметить, что российская ледовая символика существенно отличается от принятой Всемирной метеорологической организацией (ВМО) [11]; однако качественно классификация льда отличается мало. Фактически, отличается только способ отображения ледовой информации на карте.

Параллельно с развитием инструментальных методов в Советском Союзе и за рубежом велись разработки первых метеорологических космических аппаратов (КА). Первый опыт использования спутниковой информации при составлении ледовых карт был получен сотрудниками ААНИИ в 1966 г. по данным американского спутника ESSA-2 и отечественного КА Космос-122. Однако этот опыт имел больше исследовательский характер, поскольку получение изображений в оперативном режиме на тот момент было невозможным. Использование спутниковой информации при оперативном картировании льда началось в 1968 г. с появлением первой приёмной станции, самостоятельно сконструированной специалистами ААНИИ для приёма изображений КА ESSA-2 и ESSA-6. С 1975 г. начался регулярный приём информации с нового отечественного спутника Метеор-2. Запись изображений в то время производилась на фотоплёнку. После проявки кадр закладывался в фотоувеличитель и проецировался на бумажную бланковую карту, на которую карандашом наносились границы ледовых зон. Проецированием осуществлялась геопространственная привязка снимка [12].

На протяжении около десяти лет спутниковые изображения служили информацией, лишь дополняющей имевшийся на тот момент комплекс инструментальных авиационных наблюдений, и вплоть до 1979 г. карты фактически строились на основе данных авиаразведки [7].

Активное внедрение спутниковых данных в оперативную практику началось в 80-х годах XX века. С 1983 г. начали проводиться ежегодные полигонные наблюдения в районе острова Жохова (Восточно-Сибирское море) с целью изучения возможности комплексного использования авиа- и спутниковых наблюдений, а также уточнения дешифровочных признаков льда по натурным измерениям. По результатам экспедиций составлялись и уточнялись руководства по дешифрованию льда на спутниковых изображениях. В те же годы специалистами ААНИИ организовывались автономные пункты приёма спутниковой информации (АППИ) на дрейфующих станциях «Северный полюс» (СП) с целью сбора данных по всему Арктическому бассейну, так как приёмная станция, расположенная в Санкт-Петербурге (Ленинграде в то время), обеспечивала покрытие данными только в Гренландском, Баренцевом и Карском морях. Карты восточного сектора Арктики составлялись специалистами непосредственно на дрейфующей станции и направлялись в ААНИИ для составления сводной карты СЛО.

Таким образом, в период с 1980 по 1989 гг. [7] состав наблюдений за ледяным покровом достиг своего максимума. С одной стороны, имелась уже хорошо отлаженная и устоявшаяся система

инструментальных измерений, с другой стороны, к этому времени был уже довольно хорошо изучен потенциал спутниковых данных для задач ледового картирования. Пример карты, составленной в этот период приведён на Рисунке 3. Карта взята из Отчёта о научно-оперативном обеспечении зимнего плавания судов в западном районе Арктики, составленного группой Диксонского управления по гидрометеорологии и контролю природной среды (периферийного центра ААНИИ) по итогам зимнего сезона 1983/84 г. [13]. В отчёте указано, что ледовые карты строились по данным как авиационных, так и наземных визуальных наблюдений, данным контактных и дистанционных измерений толщины льда, изображениям авиационных и космических РЛС БО, а также спутниковым данным в видимом и ИК диапазонах электромагнитного спектра. В ходе авиаразведок на острове Диксон также шло уточнение дешифровочных признаков

Рисунок 3 – Карта ледовой обстановки в Карском море в период с 14 по 16 мая 1984 г. Карта составлена по данным визуальных и инструментальных наблюдений авиаразведки с привлечением спутниковой информации [13]. Карта хранится в фондах ААНИИ.

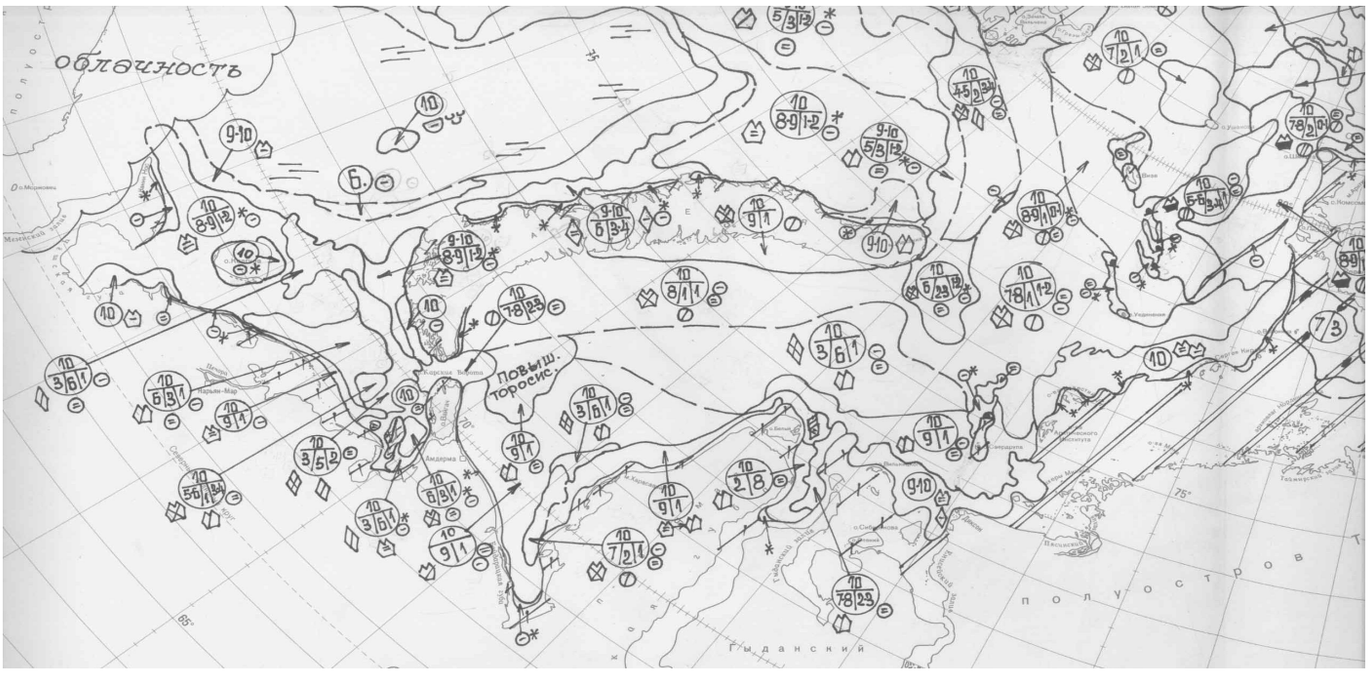

Рисунок 4 – Фрагмент сводной ледовой карты СЛО (Баренцево и Карское моря) за период с 15 по 19 февраля 1997 г. Составлена по данным дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ). Карта хранится в фондах ААНИИ.

льда на спутниковых изображениях.

С 1990 г. ледовая авиаразведка в ААНИИ прекратила своё существование, и с этого момента по сегодняшний день картирование льда производится только по спутниковым данным [7]. Многолетний опыт авиаразведки лёг в основу интерпретации спутниковых изображений, получаемых в различных диапазонах электромагнитного спектра. Так, интерпретация радиолокационных спутниковых снимков основывается на опыте работы с РЛС БО [8, 9]. Принципы дешифрирования льда на снимках в видимом и ИК диапазонах основаны на опыте визуальных авиационных наблюдений [12] и авиатермосъёмки [9].

Прежде чем приступить к описанию картирования льда в наши дни, следует отметить ещё некоторые важные моменты. В середине 1990-х гг. для записи спутниковых изображений перестала использоваться фотоплёнка, и информация в цифровом формате начала выводиться на экран. Однако ледовые карты продолжали выпускаться на бумажных бланках вплоть до начала 2000-х гг. (Рисунок 4), поскольку ещё не были разработаны необходимые инструменты для создания их в цифровом виде. Создание инструментов для автоматизированного рабочего места (АРМ) «Эксперт ледовой карты» было завершено в 2006 г., что позволило полностью перейти к использованию ГИС-технологий и оцифровке карт.

Ледовое картирование в ААНИИ в наши дни (начало XXI века).

Внедрение ГИС-технологий (ГИС – географическая информационная система) позволило перейти к выполнению всех этапов создания карт в интерактивном режиме. Для этой цели в ААНИИ с начала 2000-х гг. использовались разные поколения геоинформационного программного обеспечения компании ESRI CIS. В настоящее время весь процесс создания ледовой карты осуществляется в системе ArcGIS версии 2010 г. Дополнительный набор инструментов для АРМ «Эксперт ледовой карты» позволяет с помощью инструментов графики выделять однородные ледовые зоны на геопривязанных спутниковых изображениях с последующим преобразованием замкнутых контуров (границ выделенных зон) в полигональные объекты в виде векторного файла (формат ESRI Shape-file). Затем выделенным зонам в интерактивном режиме (с возможностью редактирования)

присваиваются атрибутивные данные с помощью специального диалогового окна. В соответствии с атрибутами, карта, состоящая из ледовых зон, автоматически представляется в российской или международной символике. Для хранения и передачи данных АРМ включает в себя инструменты для приведения структуры атрибутивной таблицы векторной ледовой карты к стандарту ВМО SIGRID-3 [14], а также для конвертации векторных ледовых карт из формата ESRI Shape-file в форматы электронных картографических навигационно-информационных систем (ЭКНИС), например, в формат S-57. Ранняя версия АРМа описана в монографии Remote sensing..., 2007 [15].

1. Исходная информация.

В настоящее время основным, а зачастую и единственным источником информации о состоянии ледяного покрова являются спутниковые изображения, регулярно (несколько раз в сутки) покрывающие всю площадь Арктического бассейна. При составлении ледовой кары эксперт анализирует различные виды спутниковых данных: данные оптической съёмки, активной радиолокации, пассивной радиометрии и др. Общие принципы этих дистанционных методов, а также влияние параметров льда на формирование изображений подробно изложены в монографиях Спутниковые методы..., 2011 и Sea Ice: Physics and..., 2015 [16, 17].

Данные тринадцати метеорологических спутников поступают на пункты приёма информации ААНИИ в режиме непосредственной передачи [18]. С 1996 г. данные спутников серии NOAA принимаются антенной, расположенной на крыше здания ААНИИ в Санкт-Петербурге. Здесь же с 2004 по 2017 г. осуществлялся приём информации со спутника Terra. С 2013 года антенный комплекс в посёлке Баренцбург (арх. Шпицберген) непрерывно ведёт приём и автоматическую обработку данных в видимом и ИК диапазонах со спутников NOAA, MetOp, Terra, Aqua, Suomi NPP, Fengyun, которые затем в готовом виде поступают к ледовым экспертам для дальнейшего анализа. При составлении ледовых карт используются также радиолокационные изображения спутников Sentinel-1 и данные пассивной радиометрии AMSR2 из открытых источников. Мониторинг льда в акваториях, расположенных вне зоны охвата антенн (морях Дальнего Востока России), полностью ведётся по открытым данным [19-22].

Для построения обзорных региональных карт, доступных на официальном сайте ААНИИ [23] и в электронном каталоге Мирового центра данных по морскому льду [24], используется информация, собранная за 2-3 суток, поскольку получить ледовую карту целого бассейна за одни сутки, как правило, невозможно из-за наличия облачности на оптических снимках и неполного суточного покрытия акватории радарными данными. Обобщение спутниковой информации за 2-3 суток даёт возможность составить обзорную карту, которая, как мозаика, состоит из отдельных частей, привязанных к разным моментам времени. Более свежая информация находится в приоритете. Если на дату составления карты нет информации по какому-то району, то берётся информация за предыдущую дату и так далее. Все накопленные за 2-3-дневный период изображения подгружаются в ГИС в виде слоёв и далее интерпретируются ледовым экспертом.

2. Методика ледового картирования в ААНИИ.

Прежде чем приступить к описанию процесса создания ледовых карт, стоит отметить, что современная методика ледового картирования целиком и полностью построена на опыте предыдущих поколений ледовых наблюдателей. Как уже указывалось выше, все рекомендации по дешифрированию спутниковых изображений были составлены по результатам подспутниковых авиационных и наземных измерений. По сегодняшний день ААНИИ придерживается своей традиционной методики, которая основана на комплексном анализе всей доступной информации, поэтому изложенное

ниже описание во многом перекликается, например, с опубликованными ранее работами [25, 26]. Задача ледового эксперта – правильно интерпретировать изображения, полученные в различных диапазонах электромагнитного спектра, что требует большого опыта и, по возможности, участия в экспедиционных работах, которые позволяют улучшить навыки дешифрирования, сравнивая спутниковые изображения с реальными ледовыми условиями.

Зимний период (1 октября – 31 мая для арктических морей).

Составление карты в зимний период начинается с определения границ основных ледовых зон - старого льда, однолетнего льда, молодого льда, ниласа (включая начальные виды льда), а также положения кромки дрейфующих льдов и границ припая. Для обрисовки этих границ в основном используются радиолокационные изображения. Граница массива старого льда в приполюсном районе Арктики выделяется за счёт высоких значений удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) и, как следствие, яркого тона этих льдов среди более тёмных однолетних. Хорошо видны также и зоны с включением старых льдов, то есть районы, где старый лёд присутствует в количестве не более 4-5 баллов по 10-балльной шкале сплочённости. Положение кромки дрейфующего льда удобно определять по радиолокационным данным, поскольку облачность на оптических снимках затрудняет наблюдение за её динамикой. При наличии более актуальной информации в оптическом диапазоне, положение кромки может быть скорректировано. Если в течение трёх суток район или его часть были закрыты облачностью и радарная съёмка района не велась, для определения положения кромки могут быть использованы данные пассивной радиометрии, особенно осенью в период активного ледообразования на чистой воде. В этот период лёд формируется очень быстро и на больших площадях.

Для других целей микроволновые данные используются мало, исходя из того, что они могут показывать ошибки, которые существенны для целей ледового картирования [27-32]. Граница припая может быть легко восстановлена по радиолокационным снимкам, снимкам видимого и ИК диапазонов, особенно в случае отжимных ветров (дующих со стороны суши), формирующих в море за припаем обширную полынью. Если дрейфующий лёд плотно прижат к границе припая и полыньи нет, то припай определяется по двум или нескольким последовательным изображениям, чаще радиолокационным, полученным по одному району за разные даты, и если подвижек льда не наблюдается, то, скорее всего, в исследуемом районе установился припай. Аналогичным образом идентифицируются и такие формы неподвижного льда, как стамухи. Косвенные признаки, позволяющие распознать стамухи на спутниковых изображениях подробно изложены в работе Платоновой Е.В и Бычковой И.А., 2018 [33]. Зоны начальных видов льда и ниласа хорошо распознаются на радиолокационных изображениях по тёмному, почти чёрному тону.

Дальнейшее более подробное разделение ледяного покрова на однородные зоны лучше производить по данным видимого и ИК диапазонов. На отображение льда в данном случае влияют такие характеристики ледяного покрова, как альбедо (в видимом и ближнем ИК диапазонах) и температура поверхности (в тепловом ИК диапазоне), которые, в свою очередь, зависят от толщины льда. На радиолокационных снимках такой однозначной зависимости нет, и выделение различных типов однолетнего и молодого льда сильно усложняется. Следует отметить, что в течение зимних месяцев в Арктике длится полярная ночь, что исключает использование данных в видимом диапазоне электромагнитного спектра с середины октября по начало февраля.

Однородные зоны отделяются друг от друга, если имеют различную общую сплочённость и/или возрастной

состав льда. Сплочённость определяется визуально по 10-балльной шкале, где 1 балл соответствует 10% площади морской поверхности. Общая сплочённость показывает долю поверхности моря, занятую льдом, а возрастной состав указывает на количественное соотношение разных типов льда (не более трёх), сформировавшихся внутри каждой ледовой зоны. Сумма частных сплочённостей всегда равна общей сплочённости. Возрастной состав льда, а также размер встречающихся ледяных образований указывается в символе, который соответствует выделенной однородной зоне. Цветовые обозначения на «зимних» картах указывают на типы льда, которые преобладают в пределах выделенных зон. Эти цвета регламентированы ледовой Номенклатурой [10]. Следует заметить, что зона с преобладанием того или иного типа льда может иметь включения как более толстых льдов, так и льдов меньшей толщины.

Летний период
(1 июня – 30 сентября
для арктических морей).

В летний сезон в ледяном покрове выделяются только зоны с разной общей сплочённостью льда без указания его возрастного состава, поскольку появление слоя талой воды на поверхности льда существенно изменяет его отображение на всех видах спутниковых изображений, и различия между типами льда становятся не видны. Для определения общей сплочённости льда в летний сезон наиболее информативными являются радиолокационные изображения, а также изображения в видимом диапазоне электромагнитного спектра. Данные тепловой ИК съёмки в этот период становятся неинформативными. Сплочённость, как и в зимний сезон, определяется визуально по 10-балльной шкале. Цветовое обозначение различных сплочённостей на «летних» картах также регламентировано Номенклатурой морских льдов. На Рисунке 5 показан пример современных ледовых карт, подготовленных в ААНИИ для Восточно-Сибирского моря в разные сезоны года.

3. Вспомогательная информация.

При составлении ледовой карты эксперт анализирует спутниковую информацию совместно с другими вспомогательными данными. Прежде чем приступить к выделению ледовых зон, оценивается величина и направление дрейфа за предшествующий период, чтобы отследить перемещение зон, выделенных ранее. Это необходимо, так как текущая ледовая карта должна быть согласована с предыдущей, поскольку кардинальных изменений ледовых условий за неделю, как правило, не происходит, за исключением особо динамичных районов. Для оперативного мониторинга дрейфа льда в ААНИИ используется алгоритм, реализованный аналогично алгоритму, описанному в работе Girard-Ardhuin F. и Ezraty R., 2012 [34]. Величина и направление дрейфа автоматически рассчитывается путем корреляционного анализа последовательных спутниковых изображений, синтезированных по микроволновым данным. Временной интервал между изображениями составляет одну неделю. Основным преимуществом использования таких данных является возможность всепогодного зондирования, независимо от освещенности поверхности, что особенно актуально в условиях высоких широт. По мере формирования суточной мозаики изображений на основе данных радиометра AMSR2 производится расчет полей дрейфа льда для всего Арктического бассейна. В дальнейшем полученные поля дрейфа в векторном формате используются для анализа смещения кромки, однородных ледовых зон или полей льда. Также эта информация используется для анализа режимных закономерностей динамики льда в рамках месяца или сезона.

Важным источником информации о состоянии ледяного покрова являются наблюдения, выполняемые на сети морских гидрометеорологических станций Росгидромета и передаваемые

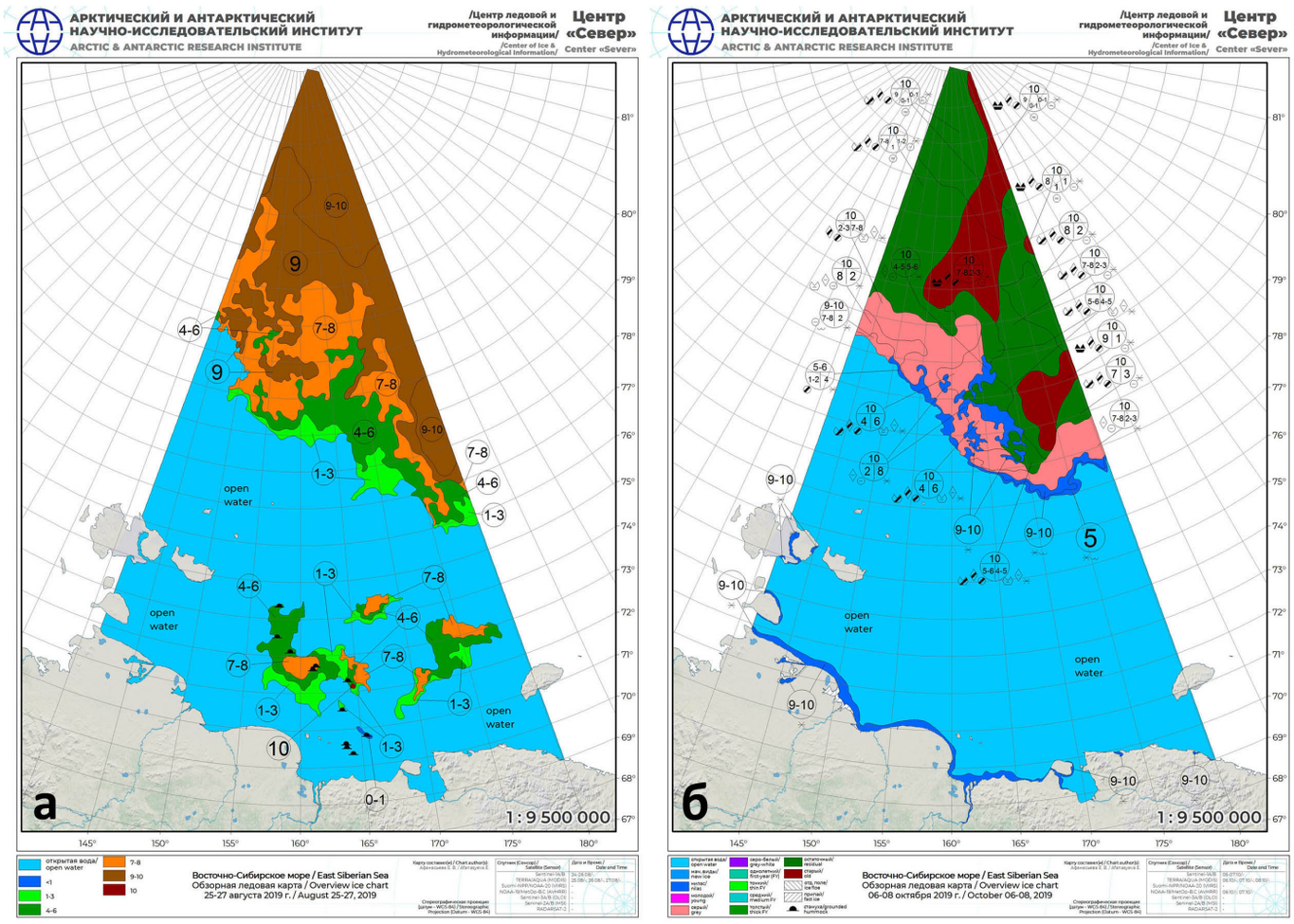

Рисунок 5 – Примеры обзорных ледовых карт ААНИИ, составленных по району Восточно-Сибирского моря 25-27 августа 2019 г. (а) и 6-8 октября 2019 г. (б).

местными управлениями по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) в Мировую базу данных. Комплекс метеорологических и ледовых наблюдений включает в себя температуру воздуха и воды, дальность видимости в сторону моря, сплочённость и тип дрейфующего льда, ширину и толщину припая, высоту снега. Данные о толщине припая используются ледовыми экспертами в качестве реперных: на спутниковых изображениях тон льда в удаленных от берега районах сопоставляется с тоном припая, толщина которого известна. Также, отслеживая фактическое изменение толщины льда на станции, можно судить о скорости нарастания льда в удалённых районах.

На Рисунке 6 показана карта распределения действующих в настоящее время (2019 г.) морских береговых станций, данные которых используются для анализа. В связи с невозможностью проведения регулярных гидрометеорологических измерений в удалённых от берега районах, для оценки скорости нарастания льда в мористых частях используются данные глобальной модели Global Forecast System (GFS) [35], а также данные реанализа Национального центра прогнозов окружающей среды (NCEP) и Национального центра атмосферных исследований (NCAR) США из открытых источников [36]. Экспертом оценивается общий температурный фон исследуемого района и приблизительная скорость нарастания льда.

Часть судов ледового класса, работающих в Российских территориальных водах, ежедневно высылают диспетчерские сообщения на адрес Центра «Север» ААНИИ. Помимо общепринятой навигационной информации (название судна, координаты, дата и др.), судоводители включают в диспетчерские сообщения наблюдаемые ими ледовые и метеорологические условия на момент составления сообщения.

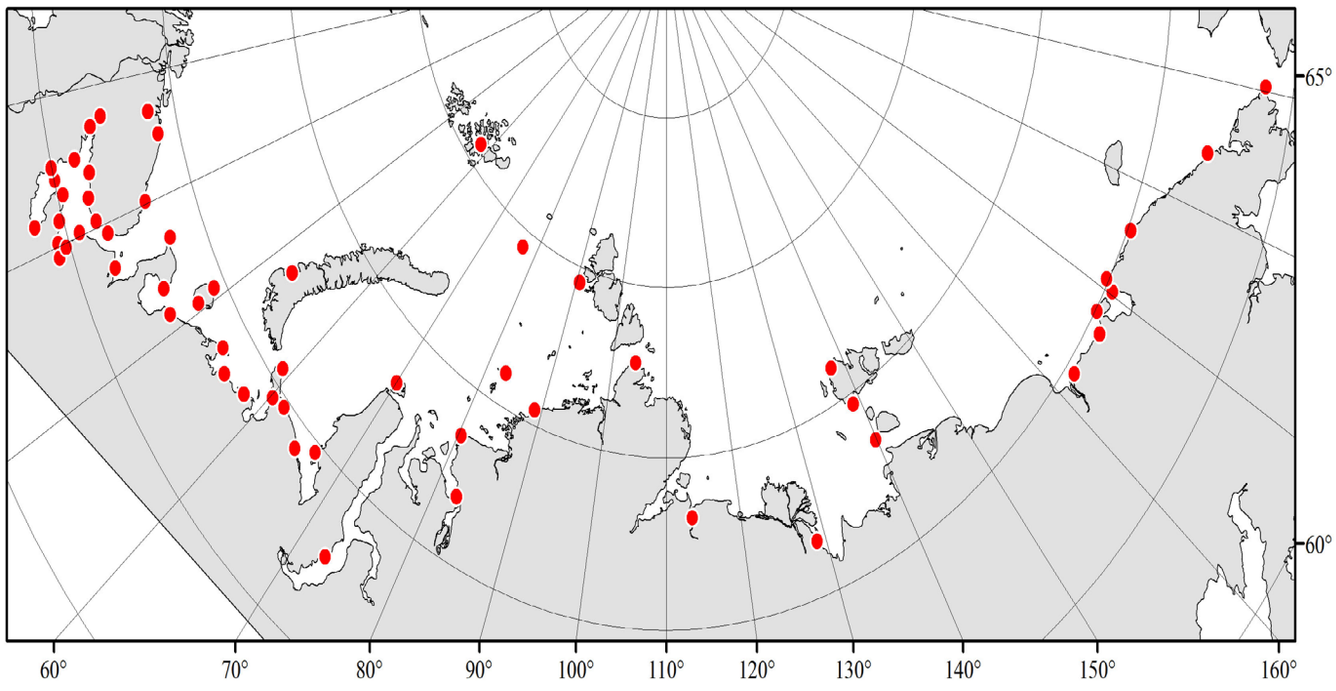

Рисунок 6 – Распределение сети морских береговых станций Росгидромета, расположенных в Арктике по состоянию на 2019 г.

В то же время с судов, на которых проходят научно-исследовательские экспедиции, организованные с участием сотрудников ААНИИ, поступает детализированная оперативная информация о ледовых и гидрометеорологических условиях плавания. Такие данные представляют ценный источник информации о текущем состоянии ледяного покрова и используются ледовым экспертом для валидации ледовых карт.

4. Принципы регионального картирования и распределение работы ледовых экспертов.

ААНИИ еженедельно выпускает ледовые карты следующих морей СЛО: Гренландского, Баренцева (включая Белое), Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, и Бофорта (включая море Линкольна). Также еженедельно составляются карты Берингова, Охотского (включая Татарский пролив Японского моря), Балтийского, Каспийского и Азовского морей. Границы арктических морей продлены до полюса таким образом, что весь СЛО оказывается поделённым на секторы, и общая карта покрывает не только акваторию моря в пределах его географических границ, но и соответствующий морю район центральной Арктики. Мониторинг каждого моря ведёт один или два ледовых эксперта, имеющих базовые знания о гидрологическом и метеорологическом режиме района, и, предпочтительно (но не во всех случаях), опыт полевых работ в данном районе. В течение зимнего сезона эксперт не меняется, что позволяет ему отследить развитие ледовой обстановки с момента ледообразования и составлять каждую новую карту, основываясь на предыстории. При необходимости смена эксперта может быть произведена в летние месяцы, но по возможности каждый эксперт занимается одной акваторией несколько лет, чтобы отследить основные закономерности внутригодовой изменчивости ледовых условий в данном районе. Для составления общей ледовой карты СЛО, секторы всех морей сводятся вместе, для чего границы ледовых зон на стыке соседних секторов должны быть согласованы между экспертами. Для унификации ледовых карт по всем районам, перед выпуском карта каждого моря проходит тщательную проверку главным и наиболее опытным ледовым экспертом центра «Север» ААНИИ. После того как общая карта СЛО готова, производится её

генерализация до шести основных зон в зимнее время: чистая вода, нилас (включая начальные виды льда), молодой лёд, однолетний лёд, старый лёд и припай; и до четырёх зон в летнее время: чистая вода, лёд сплочённостью 1-6 баллов (разреженный лёд), лёд сплочённостью 7-10 баллов (сплочённый лёд) и припай. Пример генерализированной ледовой карты показан на Рисунке 7. Генерализированные карты СЛО еженедельно обновляются на официальном сайте ААНИИ, где также доступен архив карт за период с 1997 г.

Региональные ледовые карты, составленные по отдельным морям, доступны в электронном каталоге Мирового центра данных по морскому льду [24] начиная с 1997 г. Карты, составленные в более ранний период, на данный момент находятся в процессе оцифровки.

Заключение.

Ледовые карты ААНИИ широко используются для различных научных и практических задач, однако опыт общения с пользователями показывает, что данная информация требует некоторых разъяснений. Само понятие «обзорная ледовая карта» подразумевает некое обобщение, генерализацию. Ледяной покров – очень подвижная среда, и величина суточного дрейфа может достигать 20 морских миль и более. Обзорная ледовая карта отражает лишь некое осреднённое, как правило, за 2-3 суток состояние ледяного покрова и, как уже указывалось ранее, состоит из отдельных частей, привязанных к разным датам. Поэтому при сравнении обзорных ледовых карт ААНИИ с результатами других методов и алгоритмов, основанных на интерпретации одного изображения, необходимо иметь

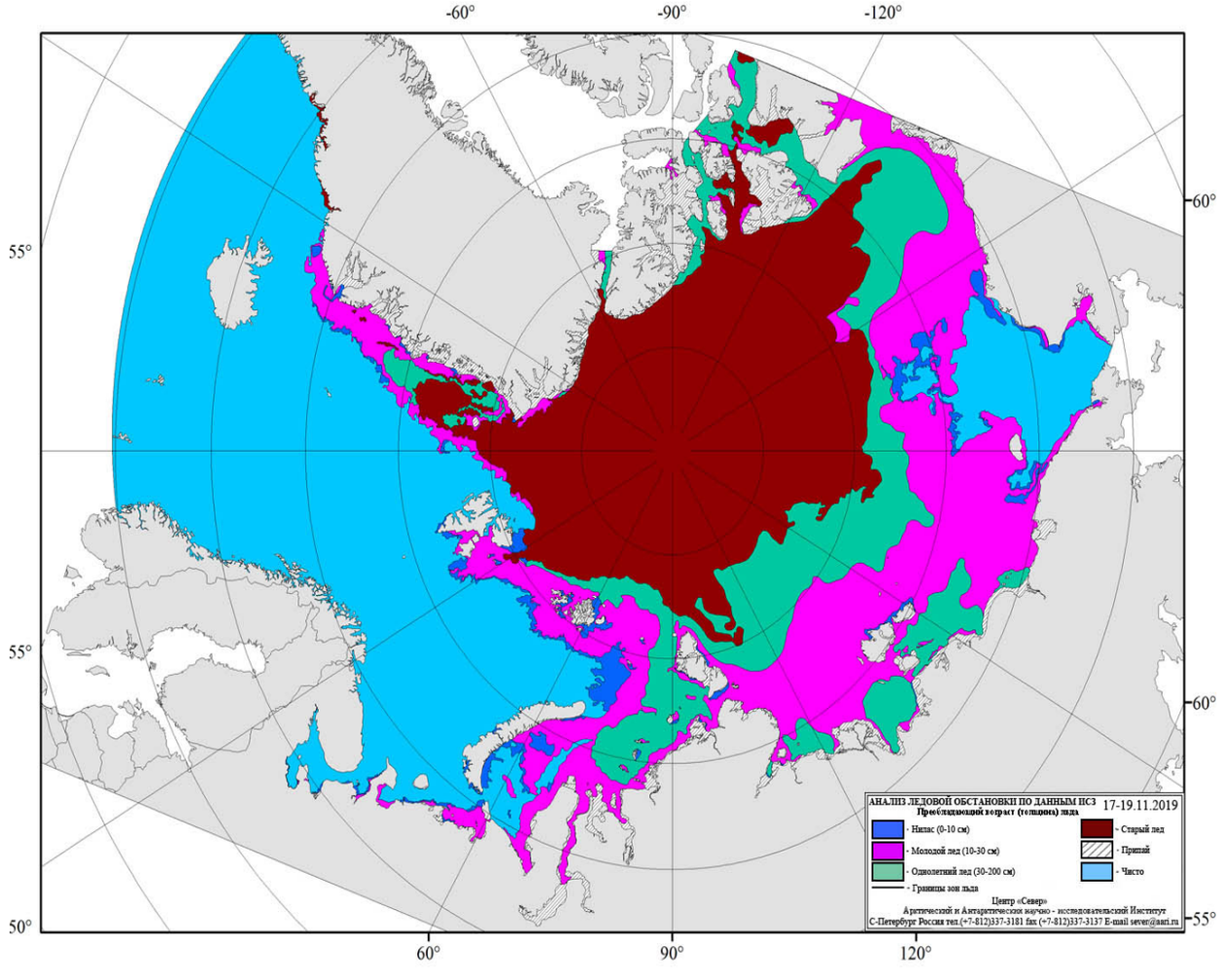

Рисунок 7 – Генерализированная ледовая карта СЛО за 17-19 ноября 2019 г. [37]

в виду, что границы зон могли быть проведены по более раннему или позднему снимку. По этой же причине, при использовании обзорных ледовых карт для судоходства, следует учитывать временной интервал, за который составлена карта. При непосредственном движении судна во льдах, после предварительной оценки ледовых условий в районе плавания по обзорной ледовой карте рекомендуется для уточнения использовать самые свежие спутниковые снимки, анализировать прогностическую метеорологическую и ледовую информацию, а также использовать срочные детализированные ледовые карты, отличающиеся более подробным описанием ледовой обстановки в конкретном районе в конкретный момент времени. Срочные детализированные карты составляются экспертами ААНИИ по одному спутниковому изображению, либо по нескольким изображениям, полученным в пределах 3-часового промежутка времени. Обзорные же ледовые карты рекомендуется использовать для предварительного планирования морских операций и общей оценки ледовой обстановки в районе движения судна. Также необходимо отметить, что цветовые обозначения на картах зимнего периода указывают только на тот тип льда, который преобладает в пределах выделенной зоны. Важная информация о количестве разводий, покрытых молодым льдом и ниласом, содержится в символе, который соответствует выделенной однородной зоне.

В заключение следует также добавить, что с конца 80-х-начала 90-х годов и по настоящее время учёные продолжают активно заниматься вопросом автоматического определения параметров ледяного покрова по спутниковым данным, полученным в различных диапазонах электромагнитного спектра. За несколько десятилетий было проведено и опубликовано огромное количество работ по данной тематике, в частности по автоматизации определения возраста (толщины) льда и его сплочённости. Обзор истории развития вопроса можно найти в монографии Sea Ice: Physics and..., 2015 [17]. Все исследователи приходят к общему мнению, что полностью автоматизировать процесс дешифрирования морского льда невозможно. У каждого метода всегда есть ряд условий, ограничивающих его применимость. Однако в настоящее время ледовые службы мира активно внедряют автоматические методы в свою работу с целью предварительного анализа спутниковой информации, которой в наши дни становится всё больше. Кроме того, каждый алгоритм разрабатывается под конкретные условия, чаще всего связанные с сезоном или географическим положением района, и грамотное применение алгоритма, безусловно, даёт ледовым аналитикам дополнительную полезную информацию, которая учитывается при составлении карт. На сегодняшний день анализ спутниковых данных в ААНИИ полностью проводится на интерактивной основе с применением ГИС; однако в будущем планируется внедрение автоматических технологий, которые станут хорошим инструментом, помогающим ускорить процесс обработки большого количества данных и снизить степень субъективности анализа. Разработанный АРМ «Эксперт ледовой карты», о котором говорилось ранее, позволит включить новые технологии непосредственно в процесс построения карты.

Благодарности.

При написании статьи были использованы неопубликованные личные воспоминания сотрудников Центра «Север»: Бушуева А.В., Быченкова Ю.Д. и Девятаева О.С. Авторы выражают благодарность также всем сотрудникам Центра, участвовавшим в развитии системы «Север», за внесённые предложения и поддержку данной работы, а также за передачу уникального опыта новому поколению.

Список литературы:

1. WMO №574, Sea-Ice Information Services in the World – Geneva, 2017.
2. http://ocean.dmi.dk/arctic/icecharts.uk.php – Архив ледовых карт Датского метеорологического института (DMI). – (дата обращения: 17.11.2019).
3. https://cryo.met.no/ – Архив ледовых карт Норвежского метеорологического института (MET.NO). – (дата обращения: 17.11.2019).
4. https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/Archive/page1.xhtml – Архив ледовых карт Канадской ледовой службы (CIS). – (дата обращения: 17.11.2019).
5. https://www.natice.noaa.gov/products/weekly_products.html – Архив ледовых карт Национального ледового центра США (NIC). – (дата обращения: 17.11.2019).
6. Моря советской Арктики. / Визе Ю. В. – М. Л.: Изд-во Главсевморпути, 1948. – 418 с.
7. Научные исследования в Арктике. / Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П., Ковалёв Е. Г., Смоляницкий В. М.; Под ред. Фролова И. Е., Карклина В. П. – СПб: Наука, 2007. – Т. 2: Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа– 135 с.
8. Исследование ледяного покрова с помощью радиолокационных станций бокового обзора (РЛС БО). / Бушуев А. В., Быченков Ю. Д., Лощилов В. С., Масанов А. Д. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 120 с.
9. Бушуев А. В., Гаврило В. П., Лебедев Г. А. Информативность различных видов и методов дистанционных ледовых наблюдений // Морской лёд / Под ред. Фролова И. Е., Гаврило В. П. – СПб: Гидрометеоиздат, 1997. – С. 345-369.
10. Номенклатура морских льдов, условные обозначения для ледовых карт. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974.
11. WMO №259, WMO Sea-Ice Nomenclature, – 2017.
12. Исследование распределения и динамики морских льдов по телевизионным снимкам ИСЗ "Метеор". / Бушуев А. В., Быченков Ю. Д. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 132 с.
13. Отчёт о научно-оперативном обеспечении зимнего плавания судов в западном районе Арктики в 1983-1984 гг. – Диксонское УГКС, о. Диксон, 1984.
14. JCOMM Technical Report №23, SIGRID-3: A vector archive format for sea ice georeferenced information and data, – 2014.
15. Bushuev A. V., Loshchilov V. S. Ice chart composition at AARI // in Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route: Studies and Applications. – Chichester: Springer Praxis, 2007. – p. 243-252.
16. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей. Под ред. Смирнова В. Г. – СПб: ААНИИ, 2011. – 240 с.
17. Sea Ice: Physics and Remote Sensing / Shokr M., Sinha N. K. – New Jersey: Wiley, 2015. – 624 p.
18. Соколова Ю. В. Центр приёма спутниковой информации ААНИИ на Шпицбергене // Российские полярные исследования. – 2019. – Т. 1, № 35. – С. 19-20.
19. https://worldview.earthdata.nasa.gov/ – Геопортал NASA Worldview. – (дата обращения: 02.12.2019).
20. https://www.bou.class.noaa.gov/saa/products/welcome – Архив данных ДЗЗ NOAA. – (дата обращения: 02.12.2019).
21. https://www.polarview.aq/index.php/arctic – Геопортал Polar View. – (дата обращения: 02.12.2019).
22. http://www.seaice.dk/test.N/2019/ – Архив данных ДЗЗ Датского технического университета. – (дата обращения: 02.12.2019).
23. http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=17 – Архив региональных ледовых карт на официальном сайте ААНИИ. – (дата обращения: 06.12.2019).
24. http://wdc.aari.ru/datasets/d0004 – Архив региональных ледовых карт ААНИИ // Мировой центр данных по морскому льду. – (дата обращения: 06.12.2019).
25. Бушуев А. В., Парамонов А. И. Общие принципы и методы дешифрирования и интерпретации данных // Морской лёд / Под ред. Фролова И. Е., Гаврило В. П. – СПб: Гидрометеоиздат, 1997. – С. 338-345.
26. Бушуев А. В. Комплексное использование информации // Морской лёд / Под ред. Фролова И. Е., Гаврило В. П. – СПб: Гидрометеоиздат, 1997. – С. 369-376.
27. Knuth M. A., Ackley S. F. Summer and early-fall Sea-ice concentration in the Ross Sea: comparison of in Situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates // Annals of Glaciology. – 2006. – Vol. 44. – p. 303-309.
28. Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S., Repina I., Raev M., Sokolova J., Sharkov E., Afanasieva E., Serovetnikov S. Comparison of Arctic Sea Ice Concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 Algorithms with Summer and Winter Ship Data // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, № 21.
29. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2008. – Vol. 113, № C2.
30. Steffen K., Maslanik J. A. Comparison of Nimbus 7 scanning multichannel microwave radiometer radiance and derived sea ice concentrations with Landsat imagery for the north water area of Baffin Bay // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1988. – Vol. 93, № C9. – p. 10769-10781.
31. Steffen K., Schweiger A. NASA team algorithm for sea ice concentration retrieval from Defense Meteorological Satellite Program special sensor microwave imager: Comparison with Landsat satellite imagery // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1991. – Vol. 96, № C12. – p. 21971-21987.
32. Kern S., Lavergne T., Notz D., Pedersen L. T., Tonboe R. T., Saldo R., Soerensen A. M. Satellite Passive Microwave Sea-Ice Concentration Data

Set Intercomparison: Closed Ice and Ship-Based Observations // The Cryosphere Discuss. – 2019. – Vol. 2019. – p. 1-55.
33. Платонова Е. В., Бычкова И. А. Многолетние наблюдения за стамухами Восточно-Сибирского моря с использованием спутниковых данных // Учёные записки РГГМУ. – 2018. – Т. 53. – С. 103-112.
34. Girard-Ardhuin F., Ezraty R. Enhanced Arctic Sea Ice Drift Estimation Merging Radiometer and Scatterometer Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – Vol. 50, № 7. – p. 2639-2648.
35. https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs – Страница официального сайта NOAA NCEI с описанием глобальной модели GFS. – (дата обращения: 20.11.2019).
36. https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.nmc.reanalysis.html – Страница с описанием данных реанализа NCEP/NCAR. – (дата обращения: 20.11.2019).
37. http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=94 – Архив генерализированных ледовых карт Северного Ледовитого океана, составленных ААНИИ. – (дата обращения: 17.11.2019).

References:

1. WMO №574, Sea-Ice Information Services in the World – Geneva, 2017.
2. http://ocean.dmi.dk/arctic/icecharts.uk.php – Danish Meteorological Institute (DMI) ice charts archive. – (accessed 17.11.2019).
3. https://cryo.met.no/ – Norwegian Meteorological Institute (MET.NO) ice charts archive. – (accessed 17.11.2019).
4. https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/Archive/page1.xhtml – Canadian Ice Service (CIS) ice charts archive. – (accessed 17.11.2019).
5. https://www.natice.noaa.gov/products/weekly_products.html – The United States National Ice Center (NIC) ice charts archive. – (accessed 17.11.2019).
6. Morya sovetskoj Arktiki. / Vize YU. V. – M. L.: Izd-vo Glavsevmorputi, 1948. – 418 p. (in Russian)
7. Nauchnye issledovaniya v Arktike. / Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Kovalyov E. G., Smolyanickij V. M.; Edited by Frolov I. E., Karklin V. P. – SPb: Nauka, 2007. – Vol. 2: Klimaticheskie izmeneniya ledyanogo pokrova morej Evrazijskogo shel'fa– 135 p. (in Russian)
8. Issledovanie ledyanogo pokrova s pomoshch'yu radiolokacionnyh stancij bokovogo obzora (RLS BO). / Bushuev A. V., Bychenkov YU. D., Loshchilov V. S., Masanov A. D. – L.: Gidrometeoizdat, 1983. – 120 p. (in Russian)
9. Bushuev A. V., Gavrilo V. P., Lebedev G. A. Informativnost' razlichnyh vidov i metodov distancionnyh ledovyh nablyudenij // Morskoj lyod / Edited by Frolov I. E., Gavrilo V. P. – SPb: Gidrometeoizdat, 1997. – P. 345-369. (in Russian)
10. Nomenklatura morskih l'dov, uslovnye oboznacheniya dlya ledovyh kart. – L.: Gidrometeoizdat, 1974. (in Russian)
11. WMO №259, WMO Sea-Ice Nomenclature, – 2017.
12. Issledovanie raspredeleniya i dinamiki morskih l'dov po televizionnym snimkam ISZ "Meteor". / Bushuev A. V., Bychenkov YU. D. – L.: Gidrometeoizdat, 1978. – 132 p. (in Russian)
13. Report on scientific and operational support for winter navigation in the western Arctic in 1983-1984. – Diksonskoe UGKS, Dikson Island, 1984. (in Russian)
14. JCOMM Technical Report №23, SIGRID-3: A vector archive format for sea ice georeferenced information and data, – 2014.
15. Bushuev A. V., Loshchilov V. S. Ice chart composition at AARI // in Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route: Studies and Applications. – Chichester: Springer Praxis, 2007. – p. 243-252.
16. Sputnikovye metody opredeleniya harakteristik ledyanogo pokrova morej. Edited by Smirnov V. G. – SPb: AANII, 2011. – 240 p. (in Russian)
17. Sea Ice: Physics and Remote Sensing / Shokr M., Sinha N. K. – New Jersey: Wiley, 2015. – 624 p.
18. 18. Sokolova YU. V. Centr priyoma sputnikovoj informacii AANII na SHpicbergene // Rossijskie polyarnye issledovaniya. – 2019. – Vol. 1, № 35. – P. 19-20. (in Russian)
19. https://worldview.earthdata.nasa.gov/ – NASA Worldview application, part of the NASA Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS). – (accessed 02.12.2019).
20. https://www.bou.class.noaa.gov/saa/products/welcome – NOAA Comprehensive Large Array-Data Stewardship System (CLASS). – (accessed 02.12.2019).
21. https://www.polarview.aq/index.php/arctic – Polar View sea ice products database. – (accessed 02.12.2019).
22. http://www.seaice.dk/test.N/2019/ – Technical University of Denmark (DTU) sea ice products database. – (дата обращения: 02.12.2019).
23. http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=17 – AARI regional ice charts archive available through the AARI official web-site. – (accessed 17.11.2019).
24. http://wdc.aari.ru/datasets/d0004 – AARI regional ice charts archive // The World Data Center for Sea Ice. – (accessed 06.12.2019).
25. Bushuev A. V., Paramonov A. I. Obshchie principy i metody deshifrirovaniya i interpretacii dannyh // Morskoj lyod / Edited by Frolov I. E., Gavrilo V. P. – SPb: Gidrometeoizdat, 1997. – P. 338-345. (in Russian)
26. Bushuev A. V. Kompleksnoe ispol'zovanie informacii // Morskoj lyod / Edited by Frolov I. E., Gavrilo V. P. – SPb: Gidrometeoizdat, 1997. – P. 369-376. (in Russian)

27. Knuth M. A., Ackley S. F. Summer and early-fall Sea-ice concentration in the Ross Sea: comparison of in Situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates // Annals of Glaciology. – 2006. – Vol. 44. – p. 303-309.
28. Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S., Repina I., Raev M., Sokolova J., Sharkov E., Afanasieva E., Serovetnikov S. Comparison of Arctic Sea Ice Concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 Algorithms with Summer and Winter Ship Data // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, № 21.
29. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2008. – Vol. 113, № C2.
30. Steffen K., Maslanik J. A. Comparison of Nimbus 7 scanning multichannel microwave radiometer radiance and derived sea ice concentrations with Landsat imagery for the north water area of Baffin Bay // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1988. – Vol. 93, № C9. – p. 10769-10781.
31. Steffen K., Schweiger A. NASA team algorithm for sea ice concentration retrieval from Defense Meteorological Satellite Program special sensor microwave imager: Comparison with Landsat satellite imagery // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1991. – Vol. 96, № C12. – p. 21971-21987.
32. Kern S., Lavergne T., Notz D., Pedersen L. T., Tonboe R. T., Saldo R., Soerensen A. M. Satellite Passive Microwave Sea-Ice Concentration Data Set Intercomparison: Closed Ice and Ship-Based Observations // The Cryosphere Discuss. – 2019. – Vol. 2019. – p. 1-55.
33. Platonova E. V., Bychkova I. A. Mnogoletnie nablyudeniya za stamuhami Vostochno-Sibirskogo morya s ispol'zovaniem sputnikovyh dannyh // Uchyonye zapiski RGGMU. – 2018. – Vol. 53. – P. 103-112.
34. Girard-Ardhuin F., Ezraty R. Enhanced Arctic Sea Ice Drift Estimation Merging Radiometer and Scatterometer Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – Vol. 50, № 7. – p. 2639-2648.
35. https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs – NOAA NCEI web-page with the Global Forecast System (GFS) model description. – (accessed 20.11.2019).
36. https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.nmc.reanalysis.html – Web-page with the NCEP/NCAR reanalysis data description. – (accessed 20.11.2019).
37. http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=94 – AARI Arctic Ocean ice charts archive. – (accessed 17.11.2019).

УДК 551.326.02
DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10072

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЬДА

С.В. Хотченков[1], Ю.Г. Гаврилов[1], М.Ю. Наумов[1]

[1]Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

✉ *hody@aari.ru, gawr@list.ru, naumike@rambler.ru*

В статье рассматриваются методические вопросы применения гидролокационного метода определения формы нижней поверхности льда, непосредственно с поверхности льда в условиях Арктики, как комплексного решения при морфометрических исследованиях. Приведены результаты опытного использования гидролокационного метода на примере измерений в море Лаптевых.

Ключевые слова: морфометрические параметры льда, гидролокационные исследования, подводная съёмка, гидролокатор, торосы, айсберги.

THE USE OF THE SONAR COMPLEX WHEN EXAMINING THE LOWER SURFACE OF THE ICE

S.V. Khotchenkov[1], YU.G. Gavrilov[1], M.YU Naumov[1]

[1]Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg

The article discusses the methodological issues of applying the sonar method to determine the shape of the lower surface of ice directly from the ice surface in the Arctic, as a complex solution for morphometric studies. The results of the experimental use of the sonar method on the example of measurements in the Laptev Sea are presented.

Keywords: morphometric parameters of ice, sonar studies, underwater photography, sonar, ice ridges, icebergs.

Введение

Объявленные приоритеты развития промышленной добычи в морских районах Арктики [1] требуют представления об особенностях формирования и развития ледового покрова и его влиянии на объекты промышленного комплекса. Одним из видов комплекса работ являются морфометрические исследования торосов в припайной и дрейфующей части ледового покрова Арктических морей. На данный момент при помощи аэрофотосъёмки с пилотных и беспилотных аппаратов, тахеометрических измерений возможно точное и оперативное построение поверхности надводной части торосов и айсбергов. Применение морфометрических измерений [2], исследований при помощи термобурения [3] и георадиолокационных методик [4] непосредственно на льду, позволяют сформировать грубый макет как внутренней структуры, так и нижней поверхности торосов. Точность при описании нижней поверхности указанными методами достигает метровых значений и не отвечает однозначно об особенностях формирования торосов и торосистых образований.

Достижение при моделировании нижней поверхности торосов такой же точности, как при описании верхней (надводной) части торосов возможно лишь при их комплексном обследовании гидролокационными и телевизионными установками [5].

Особенности методики применения комплексного подхода рассматриваются на примере использования гидролокатора 881 в специально разработанном комплекте сотрудниками ФГБУ «ААНИИ».

Технические средства

Гидролокационный комплекс представляет собой профилирующий гидролокатор кругового обзора Imagenex 881A (ГКО), оборудованный приводом вращения Azimuth Drive и модулем ориентации. В отличие от многолучевых гидролокационных систем, использование однолучевого излучателя (рис.1) позволяет оперативно производить обработку полученных данных и переводить сигнал в цифровой вид.

Комплекс достаточно компактен (рис. 2), позволяет проводить измерения с глубины до 100 м, с охватом до 200 м по всей сфере с точностью до 1 см. Для погружения аппарату требуется майна 0.25 м^2. В качестве пульта управления (далее ПУ), используется защищенный ноутбук Panasonic, подключение осуществляется по com-порту 485 RS, что обеспечивает высокоскоростной режим передачи данных. Питание осуществляется от постоянного источника или генератора с преобразователем на 24 V.

Методика проведения работ

На первом этапе, в зависимости от поставленной задачи по обследованию ледовых образований, оборудуется пункт управления (ПУ) и подготавливаются майны для погружений. В зависимости от протяженности полигона и массивности тороса оборудуется две и более майны. В среднем подготовка полигона занимает от 40 минут и более, при средней толщине льда менее метра, наличии транспорта для подвозки оборудования и количестве майн от двух штук.

На втором этапе для получения представления о массивности и протяженности подводной части тороса в первую очередь запускается подводный телевизионный осмотровый комплекс (ПТОК), в данном случае использовался комплекс на базе телевизионного аппарата (ТПА) «СуперГНОМ Про» (рис. 3). В ходе обследования, ТПА по установленному направлению и удалению от точки погружения выводится на линию профиля, после чего производится обзор вдоль профиля для определения значений глубины киля. При большом удалении от объекта обследования или его большой протяженности, обследование проводится с двух точек, в среднем на удалении 50-200 м. По результатам

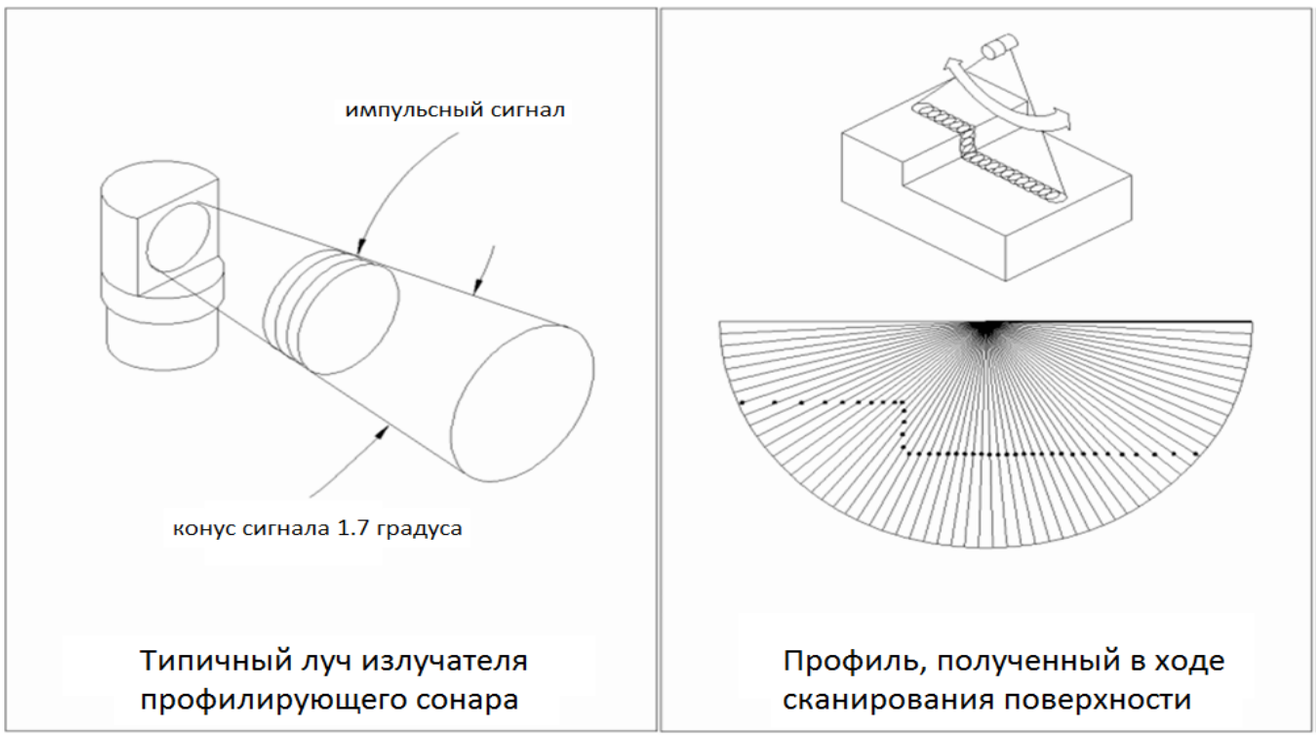

Рисунок 1 — Схема работы однолучевого гидролокатора.

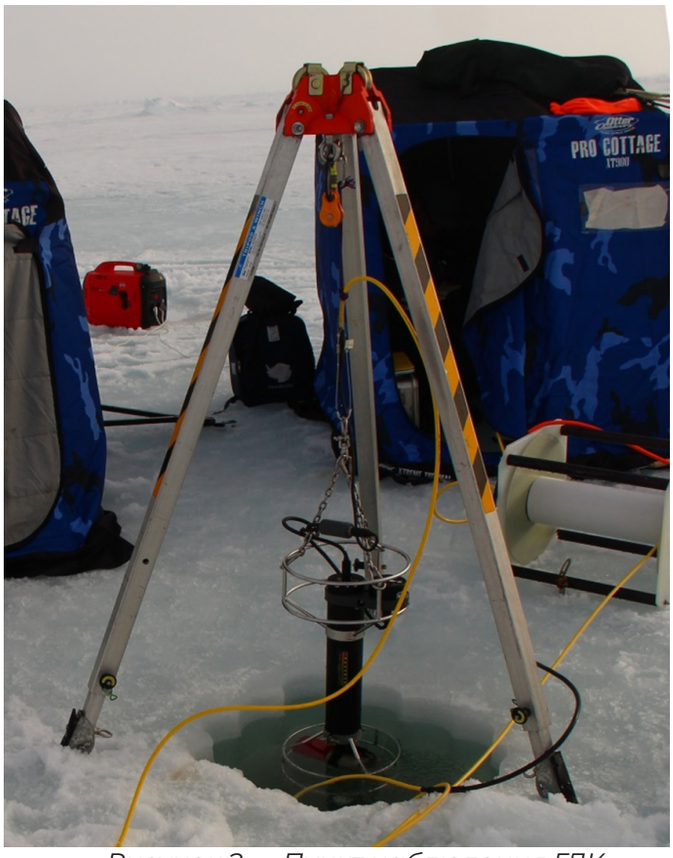

Рисунок 2 — Пункт наблюдения ГЛК перед погружением.

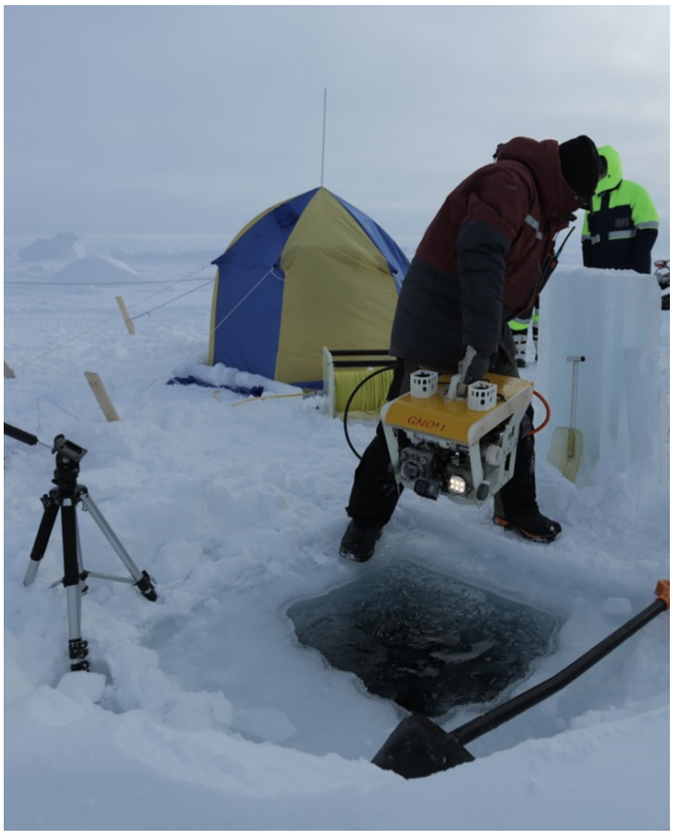

Рисунок 3 — ТПА «СуперГНОМ Про» перед погружением.

телевизионного обследования (скорость течения, максимальный киль, среднее значение киля, протяжённость подводной части тороса) выбираются места для дополнительных майн. В среднем, при дооборудовании одной майны и проведении обследования с двух точек, требуется от часа и более.

По данным STD-зондирования вычисляются значения скорости звука в воде на разных горизонтах, для ввода поправок при работе ГЛК.

На третьем этапе выполняется развёртывание, тестирование и постановка приборов ГЛК в заданных точках наблюдения (майнах). В ходе тестирования вводятся поправки на изменение скорости звука (для учёта изменения скорости звука на горизонте съёмки) и магнитного склонения. Для ввода поправок требуются данные по вертикальному профилю (до ста метров) скорости звука, получаемые из результатов зондирования или данных ROV-систем. Так как планируемые работы, в том числе, проводятся на дрейфующем льду, перед каждым погружением требуется калибровка компаса ГЛК. При работе на припае достаточно калибровки перед каждой сменой района исследования.

В связи с отработкой методики проведения съёмки нижней поверхности льда, продолжительность каждой съёмки варьируется от часа до двух часов, в среднем с одной точки проводится две съёмки. Каждая из точек погружения привязывается позже к плану тахеометрической съёмкой, позволяя далее получить единый массив данных ГЛС. В общей сложности планируется на гидролокационное обследование на один полигон от двух дней и более, в зависимости от протяженности (менее 120 м), массивности объекта, толщины льда (менее метра), наличии транспорта для перевозки ГЛК.

На четвёртом этапе производится обработка полученных данных с ПТОК и ТПА. Результаты телевизионной съёмки ПТОК монтируются для просмотра и снабжаются поясняющими комментариями. В зависимости от продолжительности (менее часа) телевизионной съёмки

просмотр и монтаж занимают от 4 часов и более.

Результаты гидролокационного обследования предварительно просматриваются, для выявления ошибок при производстве записей, и переносятся на внешний носитель для дальнейшей обработки по возвращению из экспедиции. Обработка данных требует привлечения специального программного обеспечения, позволяющего из автоматически сформированного массива данных гидролокационной съёмки (далее ГЛС) выделить данные по распределению глубин нижней поверхности заданного ледового образования, приведённые к горизонтальной плоскости в единой системе локальных координат.

Примеры использования ГЛК на НИС Мыс Баранова.

В качестве экспериментальной площадки для отработки методики комплексного обследования ледяных объектов с использованием ГЛК используется НИС «Ледовая база Мыс Баранова». НИС находится на побережье пролива Шокальского на высоком восточном берегу о. Большевик арх. Северная Земля южнее мыса Баранова и имеет координаты: 79°17’ с.ш., 101°37’ в.д. [6]. Около НИС расположен ледник Мушкетова и южнее – ледник Семенова Тянь-Шанского. На акватории, в припайном льду на зиму остаются вмороженными в лёд множество айсбергов средней величины и их обломки. Близко проходит кромка припайного льда, за которой начинается дрейфующий лёд, в результате динамических процессов происходит образование торосов. На севере пролива Шокальского открывается заприпайная полынья, с образованием участков открытой воды и молодых льдов.

В ходе сезонных работ (апрель – май 2016 г.) был исследован обломок айсберга (рис. 4), расположенный в припае на удалении 2,5 км от береговой черты. Айсберг был расположен на изобате 22 м, киль айсберга лежал на дне с ярко выраженной экзарацией донной поверхности. Общее время работы с ГЛК на объекте составило 4 дня, была выполнена комплексная съёмка с четырёх точек. Результаты гидролокационных съёмок с нескольких точек, после оперативной обработки в специальной программе WIN881A Digital Sonar, были представлены в цифровом виде как облако точек в локальных координатах.

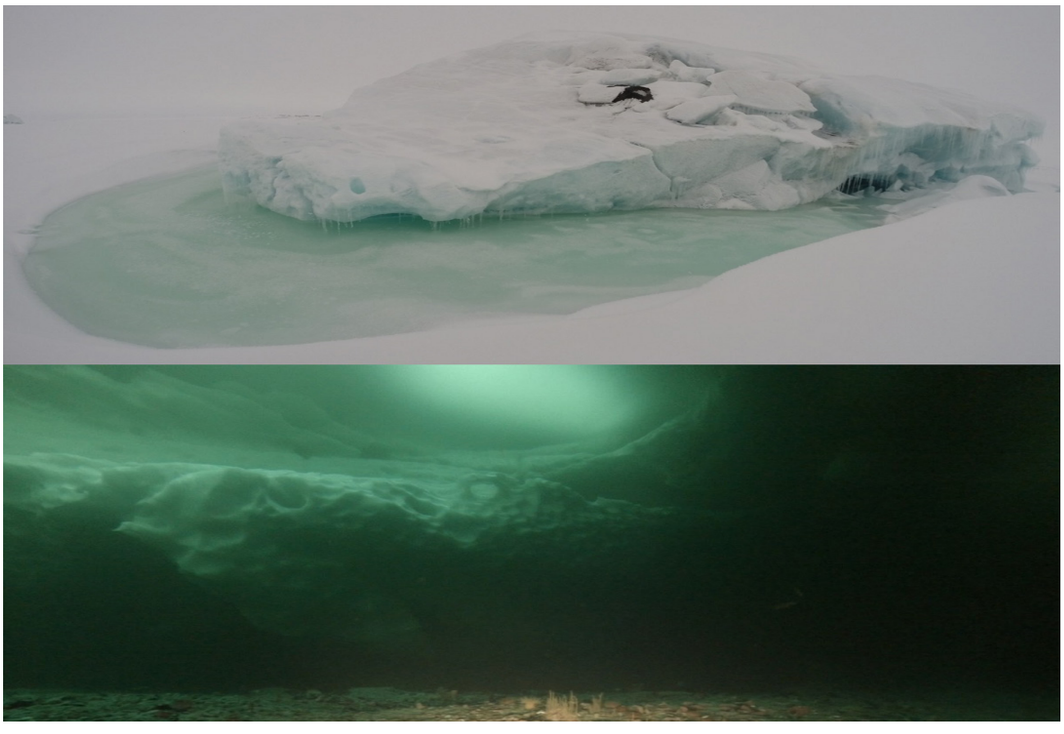

Рисунок 4 — Обломок айсберга: надводная и подводная части.

В специализированном ПО Surf3D была произведена привязка результатов съёмки к единой локальной системе координат, отфильтрованы и удалены данные донной поверхности и сформированы файлы в текстовом виде, содержащие трёхмерные координаты точек нижней поверхности айсберга, что позволило выразить привязанный к рельефу надводной части рельеф нижней поверхности в заданных координатах (рис. 5), как результат обработки в ПО Golden Software Surfer.

В ходе сезонных работ (март – апрель 2018 г.) был исследован торос, сформировавшийся в зоне взаимодействия припая и дрейфующих масс в период намерзания. Съёмка ГЛК была выполнена за один день с одной точки, с набережной стороны тороса. Одновременно исследование тороса производилось методикой термобурения, позволяющей получить данные о плотности льда в торосе в узлах регулярной сетки, что в дальнейшем позволило уточнить данные по точности измерения киля тороса данными методами.

По результатам съёмки ГЛК, также после обработки в специализированном ПО Surf3D, были сформированы файлы данных в текстовом виде, содержащие трёхмерные координаты точек нижней поверхности тороса и прилегающей области в локальных координатах. При построении плана (рис. 6) в ПО Golden Software Surfer, данные были нанесены в виде рельефа нижней поверхности льда.

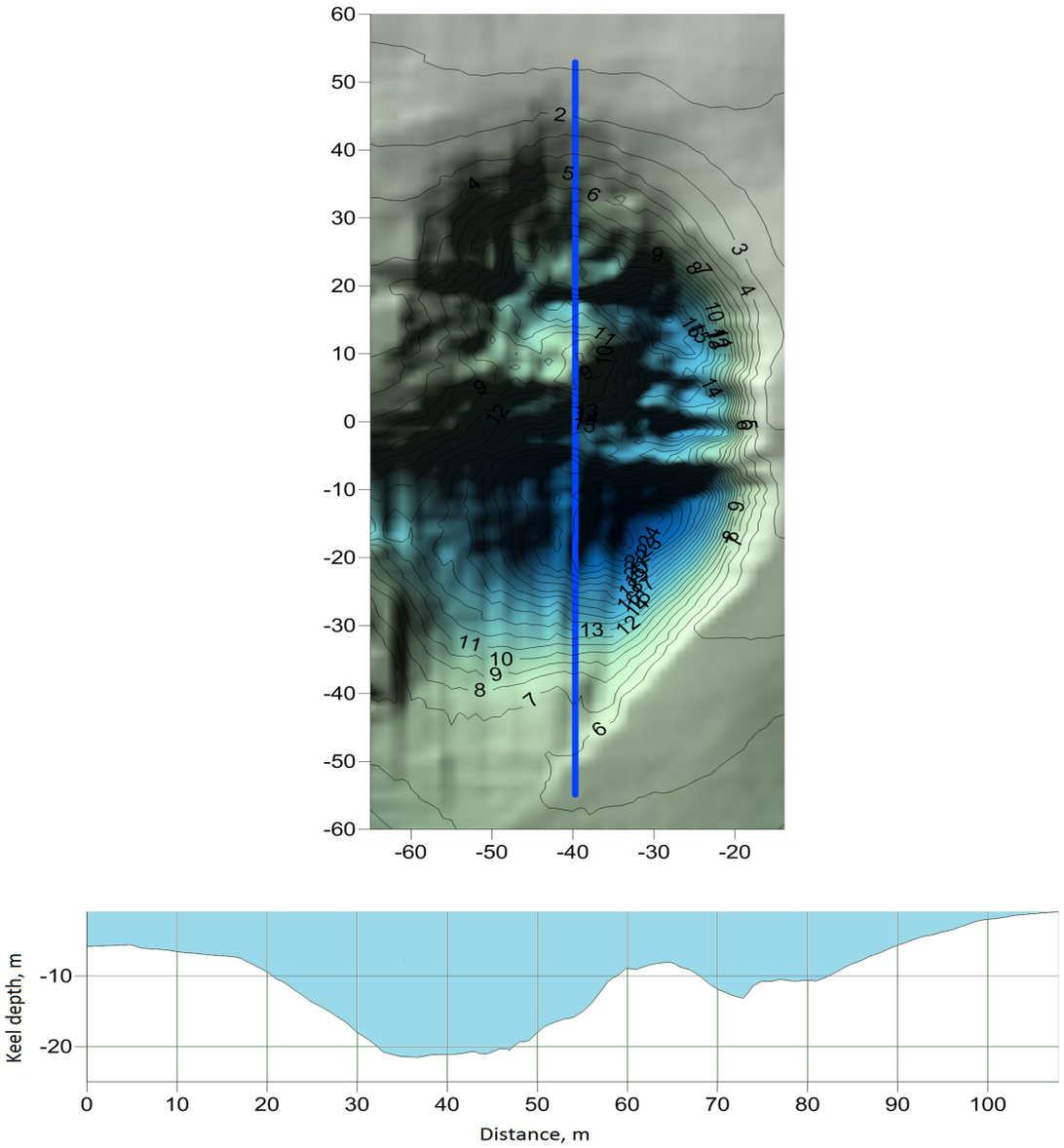

Рисунок 5 — Рельеф подводной части обломка айсберга по результатам ГЛС.

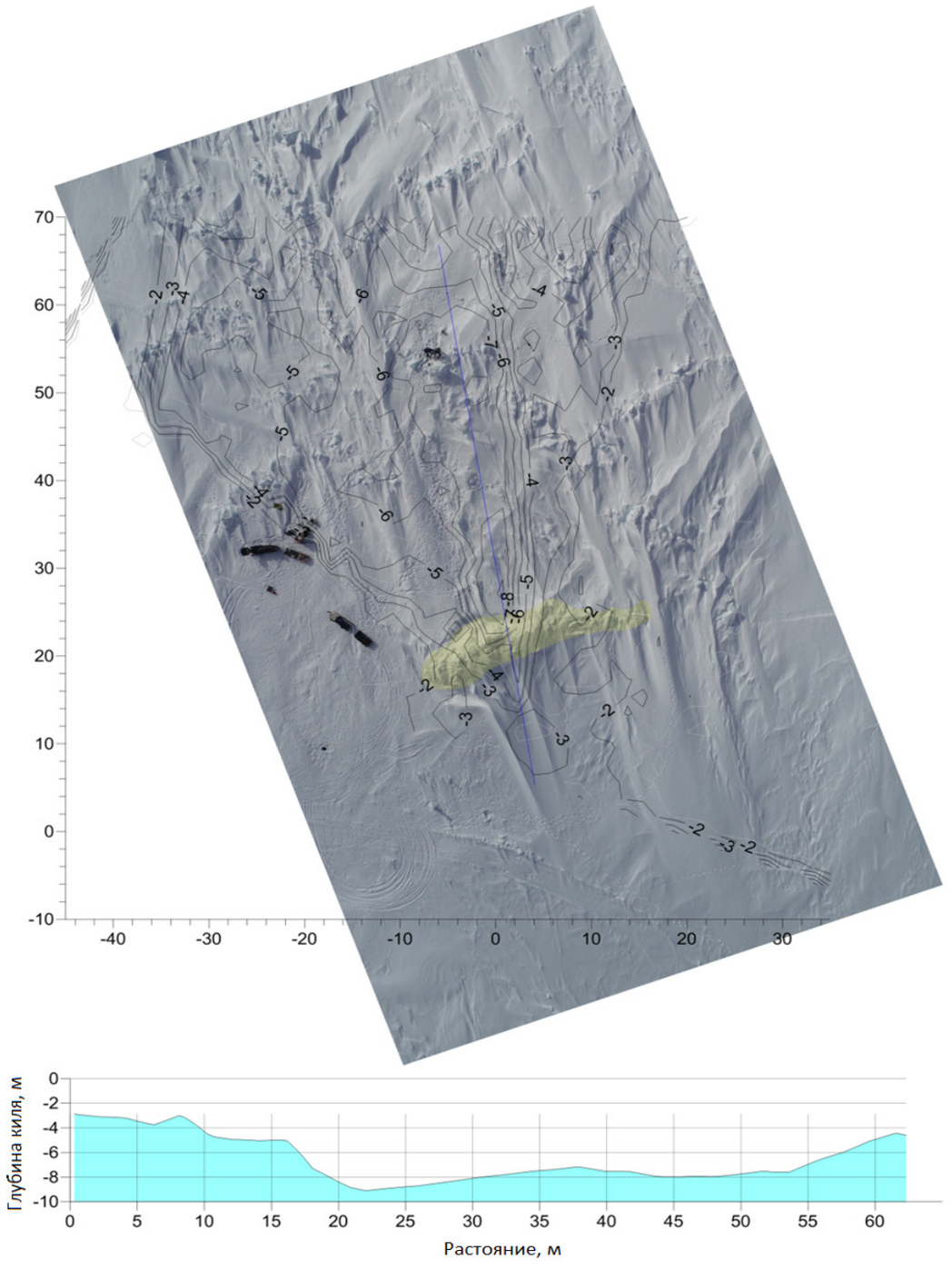

Рисунок 6 — План тороса и рельеф нижней поверхности тороса.

Перспективы использования

На основании сравнения классических методик получения морфометрических характеристик торосов, айсбергов и ровного льда (механическое бурение, термобурение) с результатами метода гидролокационного обследования выработана общая методика определения объёма, массы и таких физико-механических характеристик торосов и стамух, как внутреннее строение, распределение массы, прочности, температуры, солёности и плотности льда в торосистых образованиях [7].

Использование методики ГЛС как в комплексе, так и самостоятельно, позволяет с высокой точностью получить данные линейных характеристик на заданной площади обследования нижней (подводной) поверхности льда и ледяных образований, соответствующие точности измерения надводной части современными методами с помощью GPS-систем и электронных тахеометрических систем в цифровом виде.

Список литературы:

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года., утверждено 18.09.2008 N Пр-1969
2. Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Ковалёв С.М., Шейкин И.Б. Методическое пособие по изучению физико-механических характеристик ледяных образований как исходных данных для расчёта ледовых нагрузок на берега, дно и морские сооружения. СПб. ААНИИ. 2011, 178 с.
3. Морев В.А., Морев А.В., Харитонов В.В. Способ определения структуры торосов и стамух, свойств льда и границы льда и грунта. Патент на изобретение № 2153070 от 20.07.2000.
4. СП 11-114-2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. Госстрой России. М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ФГУП «ПНИИИС») Госстроя России, 2004, 88 с.
5. Yevgeny U. Mironov, Roman B. Guzenko, Viktor S. Porubaev, Victor V. Kharitonov, Stepan V. Khotchenkov and Aleksandr V. Nesterov Morphometric Parameters of Stamukhas in the Laptev Sea, International Journal of Offshore and Polar Engineering, ISOPE-2019, Honolulu, Hawaii, USA, 2019.
6. Итоги работ на НИС «Ледовая база «Мыс Баранова» в период октябрь 2016 –сентябрь 2017 гг. Расположены на: http://www.aari.ru/news/text/2017/%D0%9D%D0%98%D0%A1%20%D0%9C%D0%91%202017%20%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%B3%D0%B8.pdf
7. Способ определения физико-механических и морфометрических характеристик ледовых торосистых образований. ФИПС, Москва; Заявка на патент 2019133637 от 22.10.2019

References:

1. Strategiya razvitiya Arkticheskoj zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti na period do 2020 goda., utverzhdeno 18.09.2008 N Pr-1969
2. Smirnov V.N., SHushlebin A.I., Kovalyov S.M., SHejkin I.B. Metodicheskoe posobie po izucheniyu fiziko-mekhanicheskih harakteristik ledyanyh obrazovanij kak iskhodnyh dannyh dlya raschyota ledovyh nagruzok na berega, dno i morskie sooruzheniya. SPb. AANII. 2011, 178 s.
3. Morev V.A., Morev A.V., Haritonov V.V. Sposob opredeleniya struktury torosov i stamuh, svojstv l'da i granicy l'da i grunta. Patent na izobretenie № 2153070 ot 20.07.2000
4. SP 11-114-2004. Inzhenernye izyskaniya na kontinental'nom shel'fe dlya stroitel'stva morskih neftegazopromyslovyh sooruzhenij. Gosstroj Rossii. M.: Proizvodstvennyj i nauchno-issledovatel'skij institut po inzhenernym izyskaniyam v stroitel'stve (FGUP «PNIIIS») Gosstroya Rossii, 2004, 88 s.
5. Yevgeny U. Mironov, Roman B. Guzenko, Viktor S. Porubaev, Victor V. Kharitonov, Stepan V. Khotchenkov and Aleksandr V. Nesterov Morphometric Parameters of Stamukhas in the Laptev Sea, , International Journal of Offshore and Polar Engineering, ISOPE-2019, Honolulu, Hawaii, USA, 2019.
6. Itogi rabot na NIS «Ledovaya baza «Mys Baranova» v period oktyabr' 2016 –sentyabr' 2017 gg. Available at: http://www.aari.ru/news/text/2017/%D0%9D%D0%98%D0%A1%20%D0%9C%D0%91%202017%20%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%B3%D0%B8.pdf
7. Sposob opredeleniya fiziko-mekhanicheskih i morfometricheskih harakteristik ledovyh torosistyh obrazovanij. FIPS, Moskva; Zayavka na patent 2019133637 ot 22.10.2019.

УДК 551.583:551.46
DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10073

МЕЖГОДОВАЯ И СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛОЩАДИ ЛЬДОВ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

А.В. Юлин[1], Н.А. Вязигина[1], Е.С. Егорова[1]

[1]Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

✉ *icefor@aari.ru, naty_vyazik@mail.ru, egorova@aari.ru*

Проанализированы межгодовые и сезонные изменения площади льда Северного Ледовитого океана по результатам спутникового мониторинга за ряд наблюдений 1978–2018 гг. Отмечено, что за исследуемый период площадь ледяного покрова устойчиво сокращалась, особенно в летний сезон, причём в последнее десятилетие (2009–2018 гг.) скорость её уменьшения заметно возросла. Сокращение площади льда происходило неравномерно по сезонам года. Показано, что в настоящее время процессы сокращения ледяного покрова летом и его нарастания зимой начали происходить раньше и интенсивнее, чем в 70–80-е годы прошлого столетия.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, ледяной покров, межгодовая и сезонная изменчивость, интенсивность изменения площади льда.

INTERANNUAL AND SEASONAL VARIABILITY OF ARCTIC SEA ICE EXTENT ACCORDING TO SATELLITE OBSERVATIONS

A.V. Yulin[1], N.A. Vyazigina[1], E.S. Egorova[1]

[1]Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg

The interannual and seasonal changes of Arctic sea ice extent according to satellite observations from 1978–2018 are analyzed. Steady reduction in the sea ice cover over the research period is reported. In addition, we denoted the especially pronounced during the summer months acceleration of the reduction of the sea ice extent in 2009–2018. The uneven reduction of the sea ice extent over the seasons is shown. In 2009–2018 the processes of the reduction of the sea ice are earlier and faster than in 1979–1988.

Keywords: Arctic Ocean, sea ice extent, interannual and seasonal variability, rate of the sea ice extent change.

Введение

Площадь льда в Северном Ледовитом океане (СЛО) и его морях является наиболее доступным и информативным показателем состояния климатической системы «атмосфера–лёд–океан» и происходящих в этой системе изменений. Выхолаживание океана в осенне-зимний период приводит к увеличению площади льда и нарастанию его толщины, а нагревание в весенне-летний период — к таянию льда и уменьшению площади льда.

В работе анализируется межгодовая и сезонная изменчивость площади льда в СЛО за период спутниковых наблюдений с 1978 по 2018 гг. Мониторинг состояния площади ледяного покрова показывает, что в межгодовой изменчивости площади льда в СЛО наблюдаются существенные количественные изменения как в зимний, так и в летний период.

Следует отметить, что изменчивость ледяного покрова СЛО изучается уже достаточно давно.

Целым рядом исследователей установлено, что за период регулярных спутниковых наблюдений сохраняется устойчивая тенденция к уменьшению ледяного покрова в СЛО, которая особенно усилилась в последнее десятилетие [1, 2, 3, 4]. Подтверждение этого факта следует из сравнения значений площади льда СЛО за различные десятилетия: десятилетие начала регулярных спутниковых изменений в 70-80 гг. прошлого столетия, когда площадь ледяного покрова в конце зимнего периода в среднем достигала 12000–12300 тыс. км^2, а в летний период таяния уменьшалась до 7200–7700 тыс. км^2, и за последнее десятилетие современного периода, в котором площадь льда сократилась до 11300–11700 тыс. км^2 и 4600–5500 тыс. км^2 соответственно.

Изменение площади льда в СЛО имеет хорошо выраженный сезонный ход, в котором за последнее десятилетие также отмечаются значительные изменения. В рассматриваемый период 2009–2018 гг. увеличилась повторяемость отрицательных аномалий площади льда и число её абсолютных минимумов. В конце зимнего периода 2016 г. наблюдался абсолютный минимум нарастания льда за весь ряд наблюдений с 1978 г., достигший 11365 тыс. км^2, а в 2012 г. — абсолютный минимум летнего сокращения площади льда, составивший 3515 тыс. км^2. В осенний период 2018 г. наблюдался абсолютный максиму нарастания льда за месяц, когда площадь ледяного покрова с октября по ноябрь увеличилась на 3477 тыс. км^2.

Очевидно, что в изменениях площади льда в СЛО в последнее десятилетие начали проявляться значительные межгодовые и сезонные колебания от года к году, приводящие к аномальному развитию и проявлению ледовых явлений. Произошедшие изменения в состоянии площади ледяного покрова в СЛО в летний и зимний периоды требуют их дополнительного детального анализа.

Используемые данные

В работе используется массив данных Мирового центра данных по морскому льду (NSIDC), основой которого являются данные с дискретностью 1–2 суток пассивного микроволнового зондирования Северной полярной области SSMR-SSM/I-SSMIS по алгоритму NASATEAM, копируемые МЦД МЛ из архива Национального ледового центра данных США по снегу и льду (НЦДСЛ). Эти данные охватывают период с 26.10.1978 г. по настоящее время [5, 6]. Массив данных представляет собой матрицы оценки общей сплоченности морского льда в процентах по ячейкам сетки полярной стереографической проекции размерностью 25×25 км. Следует отметить, что эти данные имеют известные ограничения и погрешности, среди которых занижение сплоченности для разрушенного льда в период таяния, полос и пятен, ложные эффекты в береговой зоне и зонах движения полярных циклонов. Однако используемый массив данных при должном экспертном контроле предоставляет уникальные возможности для оценки вероятностных характеристик сплоченности льда, а также положения его кромки и ледовитости.

В работе используются среднемесячные значения площади льда в СЛО за ряд наблюдений с осеннего периода 1978 г. до конца 2018 г. Архив данных доступен на сайте ФГБУ «ААНИИ» по ссылке [http://wdc.aari.ru, 5].

Межгодовая изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане

На Рисунке 1 демонстрируется межгодовой ход среднемесячных значений площадей ледяного покрова для двух наиболее характерных месяцев года (апрель и сентябрь), а также среднегодовых значений за весь ряд наблюдений с 1978 по 2018 гг. Апрель является периодом максимального нарастания ледяного покрова и характеризует накопление льда за прошедший осенне-зимний период. Сентябрь относится к периоду максимального сокращения ледяного покрова, когда наблюдается уменьшение его площади в результате

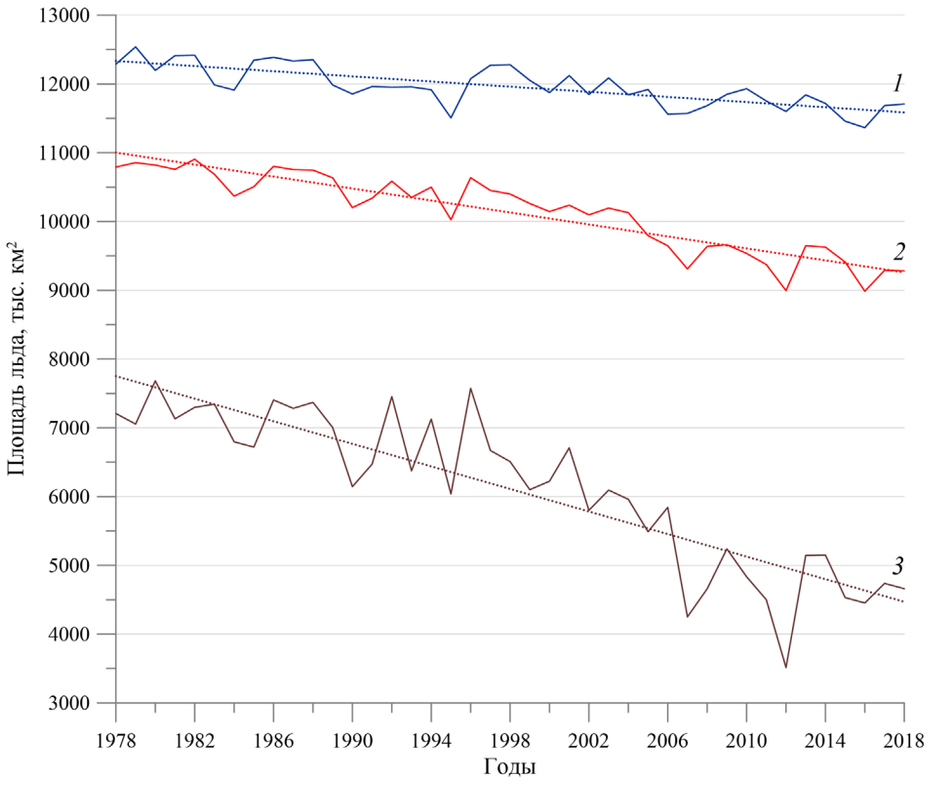

Рисунок 1 — Межгодовые изменения значений площади льда в СЛО: 1 — на период максимального накопления в апреле, 2 — среднегодовой площади, 3 — на период максимального разрушения в сентябре, и их линейные тренды (пунктирные линии).

весенне-летнего таяния. Среднегодовые значения площади льдов характеризуют итоговый баланс площади льда в СЛО результате зимнего накопления и летнего разрушения.

Изменения площади льда в СЛО проявляет устойчивую тенденцию к уменьшению [2, 3, 4]. Амплитуда межгодовых колебаний площади ледяного покрова в апреле значительно меньше, чем амплитуда колебаний, наблюдающаяся в сентябре (см. рис. 1).

В Таблице 1 приводятся статистические характеристики среднемесячных значений площадей ледяных массивов и показатели их вариации.

В конце зимнего периода нарастания (в марте–апреле) в годы максимального развития ледяного покрова площадь льда может достигать 12539–12608 тыс. км^2, а в годы минимального развития — 11329–11365 тыс. км^2. Тогда амплитуда наблюдаемых изменений изменяется в пределах от 1175 до 1280 тыс. км^2, а среднеквадратическое отклонение составляет около 300 тыс. км^2.

В конце летнего периода таяния (в августе–сентябре) в годы максимального сокращения площадь ледяного покрова может уменьшаться до 3515–4754 тыс. км^2, а в годы максимального сохранения — до 7682–8081 тыс. км^2. Тогда амплитуда наблюдаемых изменений составляет 3327–4168 тыс. км^2, а среднеквадратическое отклонение — около 1000 тыс. км^2.

Таким образом, амплитуда межгодовых колебаний площади ледяного массива может достигать нескольких миллионов квадратных километров, а среднеквадратическое отклонение — от 300 тыс. км^2 в зимний до 1000 тыс. км^2 в летний период.

Наибольшие межгодовые изменения площади ледяного покрова в СЛО отмечаются в сентябре, т.е. конце летнего периода таяния. В годы с большим развитием ледяного покрова его площадь может доходить до значения в 7600 тыс. км^2. В этом случае на акватории всех российских арктических морей возможно наличие дрейфующих льдов, блокирующих судоходные трассы и участки побережья. В годы минимального развития ледяной покров СЛО составляет не более 3515 тыс. км^2. При этом ото льдов

Таблица 1

Среднемесячные значения площади льда в Северном Ледовитом океане и основные статистики их изменений за ряд наблюдений 1978-2018 гг., тыс. км²

Месяцы	Показатели, тыс. км²				
	Среднее значение	Минимум	Максимум	Амплитуда	Стандартное отклонение
I	11810	11095	12579	1484	377
II	11918	11207	12682	1475	361
III	11971	11329	12608	1280	294
IV	11962	11365	12539	1175	294
V	11684	10819	12407	1588	344
VI	10901	9834	11765	1930	524
VII	8961	7553	10116	2564	820
VIII	6859	4754	8081	3327	963
IX	6113	3515	7682	4168	1118
X	7927	5718	9312	3595	1048
XI	10093	8348	11150	2802	627
XII	11401	10303	12202	1899	454
Среднее за год	10132	8986	10906	1920	565

освобождаются акватории всех российских арктических морей и часть центрального арктического бассейна. Амплитуда колебаний площади ледяного покрова между годами с максимальным и минимальным развитием может достигать 4168 тыс. км², что практически сопоставимо с площадью европейской части России (5183 тыс. км²).

Наглядное представление о большой межгодовой изменчивости ледяного покрова в СЛО дает распределение ледяного покрова за годы, когда после летнего таяния наблюдалась большая и малая остаточная ледовитость в сентябре (рис. 2). В годы большой ледовитости акватория российских арктических морей не очищается ото льдов вплоть до осеннего периода нового ледообразования. В годы малой ледовитости акватория всех арктических морей полностью очищается ото льдов, на трассе СМП наблюдается чистая вода, а граница дрейфующих льдов наблюдается в районе 80–85°с.ш.

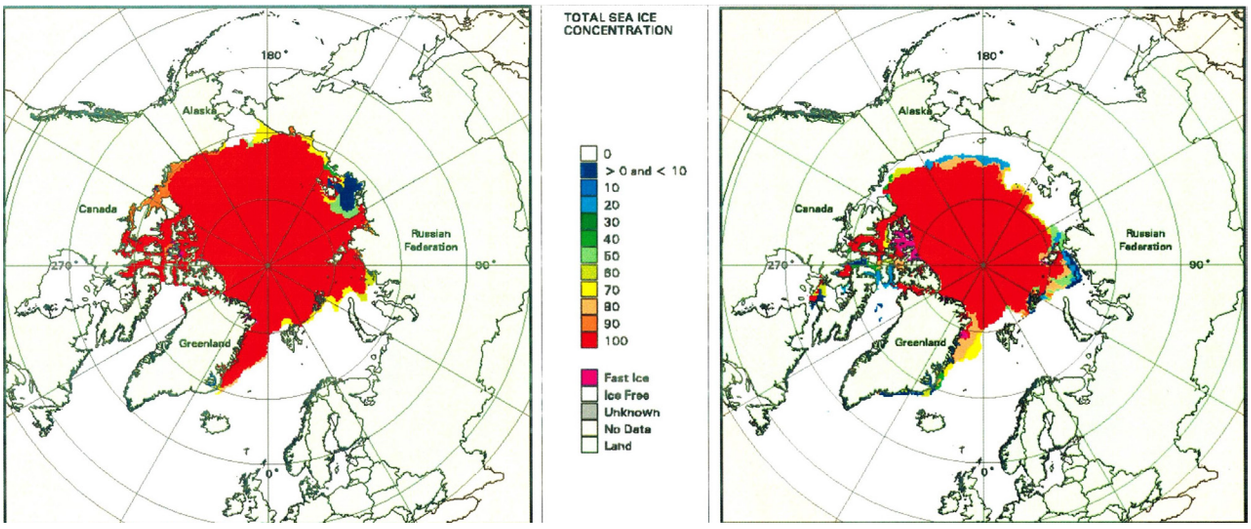

Рисунок 2 — Карты фактического распределения ледяного покрова в годы с большим (левый рисунок) и малым (правый рисунок) развитием ледяного покрова в сентябре [5].

Анализ плотности распределения среднегодовых значений площади льда в СЛО за ряд наблюдений 1978–2018 гг. (рис. 3) показывает, что исследуемый ряд имеет двухмодальное распределение, которое характеризуется двумя характерными группами величин. Первая из них объединяет повторяемости повышенной ледовитости (в интервале изменений 10000–11000 тыс. км^2) и характеризует период 1978–1998 гг. Вторая связывает повторяемости пониженной ледовитости (в интервале изменений 8800–9900 тыс. км^2) и отмечается для двух последних десятилетий.

Главной особенностью межгодовой изменчивости площади льда, проявившейся за 42-летний период, стало наличие устойчивых отрицательных трендов, которые хорошо аппроксимируются линейными функциями [2, 3, 4]. Тренды статистически значимы (для 95% уровня значимости) и дают высокие коэффициенты детерминации, порядка 0,7–0,8, что показывает высокий вклад тренда в общей дисперсии изменчивости площади льда в СЛО.

Линейное (по тренду) уменьшение площади ледяного покрова за весь 42-летний ряд составляет – 18 тыс. км^2 за год для апреля, – 80 тыс. км^2 за год для сентября и –40 тыс. км^2 в целом за год (см. рис. 1).

Однако, как отмечается рядом авторов [1, 2, 3, 4], уменьшение площади ледяного покрова в СЛО за наблюдаемый период происходит неравномерно. Для последних двух десятилетий характерно ускоряющееся сокращение площади морского льда, особенно хорошо выраженное в летний период. Проверка вида линейных трендов отдельно за десятилетия 1978–1998 и 1999–2018 гг. показывает, что за последние два десятилетия действительно наблюдается ускорение сокращения площади морского льда в СЛО, которое проявляется как в зимний, так и в летний периоды (рис. 4). Особенно заметное уменьшение площади ледяного покрова отмечается для летнего периода (см. рис. 4 б).

В Таблице 2 приводятся среднемесячные значения площади льда в СЛО за десятилетия повышенной (1979–1988 гг.) и пониженной (2009–2018 гг.) ледовитости, а также разность между ними.

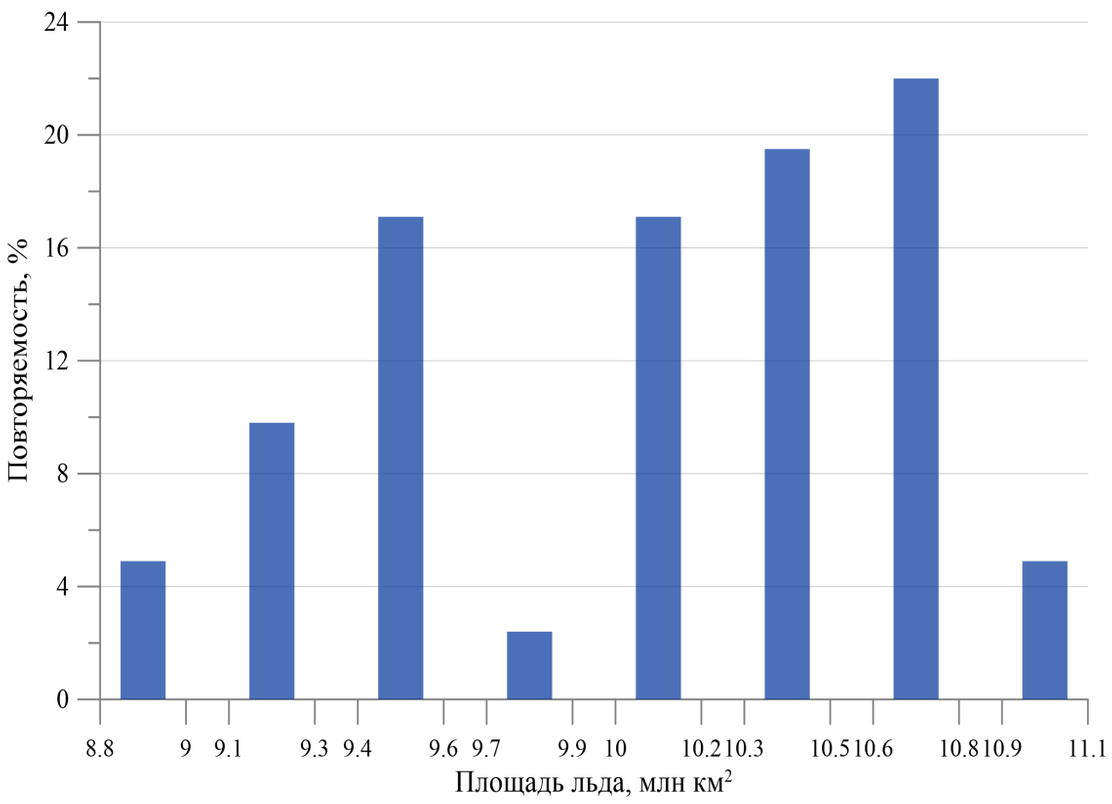

Рисунок 3 — Плотность распределения среднегодового количества льда в СЛО за весь ряд наблюдений 1978–2018 гг.

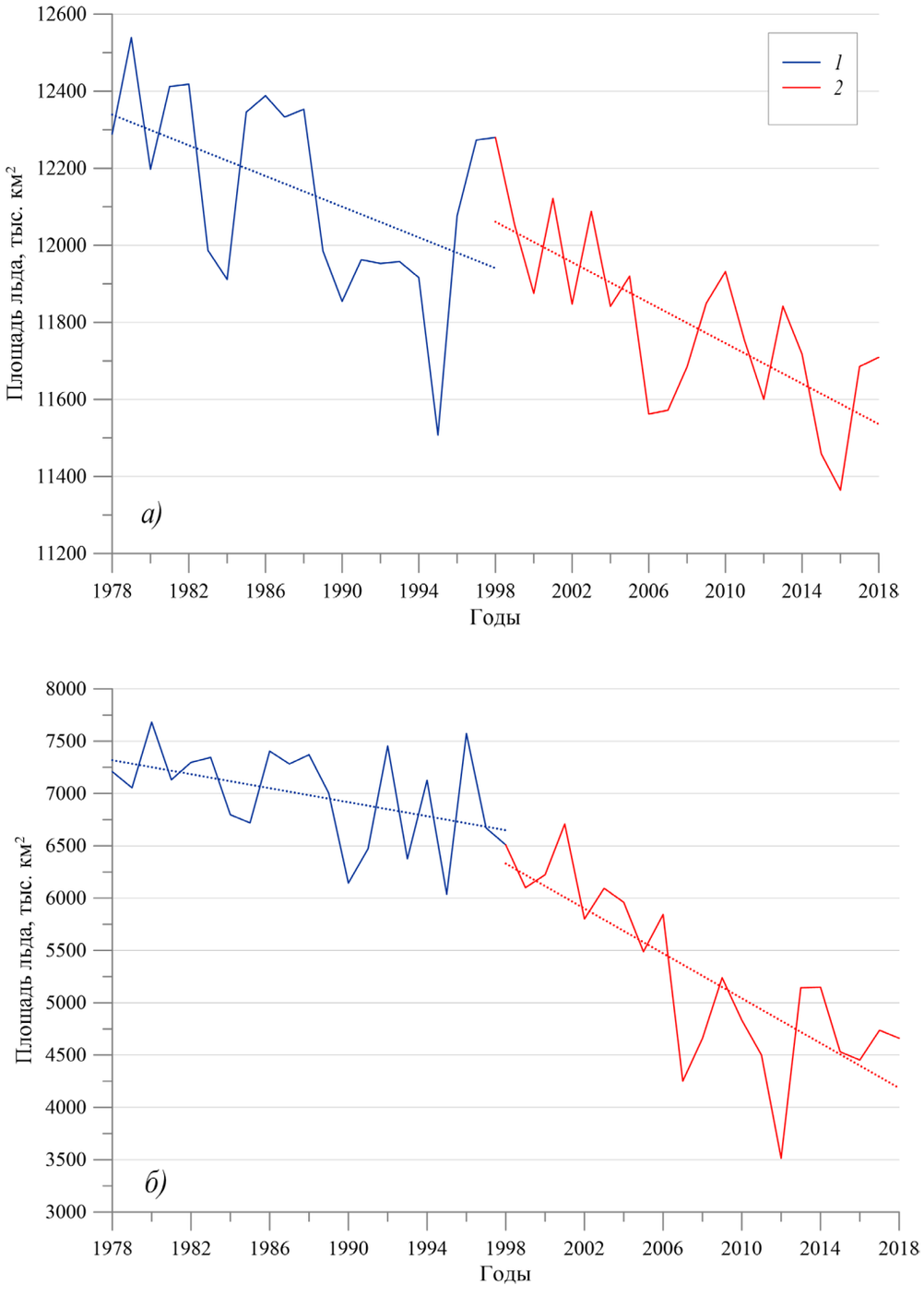

Рисунок 4 — Аппроксимация межгодовых изменений площади льда в СЛО в период максимального накопления в апреле (а) и максимального таяния в сентябре (б) за два двадцатилетних периода: 1 — период 1978–1998 гг., 2 — период 1999–2018 гг. и их линейные тренды (пунктирная линия).

Из приведенных данных (см. табл. 2) следует, что за 42-летний период наблюдений произошло общее уменьшение площади льда в СЛО, неравномерно проявившееся по сезонам. В зимний период площадь льда сократилась на 600–700 тыс. км^2 и соответственно на такую же величину увеличилась площадь чистой воды в западных морях Арктики (в Гренландском и Баренцевом). В летний период сокращение площади оказалось более значительным и составило 2200–2500 тыс. км^2. Следовательно, на такую величину увеличилось площадь чистой воды по всем окраинным морям СЛО. Таким образом, если в десятилетие 1979–1988 гг. в летний период очищалась ото льдов около половины площади океана, то в последнее десятилетие 2009–2018 гг. в среднем очищается почти 2/3 его акватории (68%).

Таблица 2

Среднемесячные значения площади льда в Северном Ледовитом океане за выделенные десятилетия повышенной и пониженной ледовитости, тыс. км²

Месяцы	Периоды наблюдений		
	1979–1988 гг.	2009–2018 гг.	Разность между периодами
I	12151	11395	756
II	12253	11520	733
III	12268	11650	617
IV	12288	11691	597
V	12043	11312	730
VI	11457	10210	1247
VII	9806	7852	1954
VIII	7792	5583	2208
IX	7208	4676	2532
X	8889	6538	2351
XI	10664	9292	1372
XII	11827	10854	973
Среднее за год	10720	9380	13400

Сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане

Изменение площади льда в СЛО в годовом цикле имеет хорошо выраженный сезонный ход [3, 4, 7], в котором можно выделить три основных периода:

- период весенне-летнего сокращения площади с мая по сентябрь (5 месяцев),
- период интенсивного осенне-зимнего нарастания площади с октября по декабрь (3 месяца),
- период незначительного зимнего нарастания площади, с января по апрель (4 месяца).

Особенности сезонного хода определяются процессами, происходящими в Арктике.

Ледообразование в СЛО начинается в конце августа в массиве остаточных льдов к северу от широты 80°с.ш. и продолжается в течение всего сентября в самом массиве и в узкой прикромочной зоне, не приводя к значительному увеличению площади молодых льдов. С конца сентября граница ледообразования выходит за пределы массива остаточных льдов и ледообразование активно распространяется на пространства чистой воды. Площадь льда в СЛО начинает интенсивно увеличивается.

Процессы увеличения площади льда продолжаются с октября по апрель. С октября по декабрь увеличение площади ледяного покрова происходит очень интенсивно: в этот период она увеличивается на 1500–2000 тыс. км² ежемесячно вплоть до января. Интенсивность нарастания площади уменьшается в январе и далее до апреля не превышает 20–100 тыс. км² в месяц (менее 1% от площади льда в СЛО в этот период), несмотря на всю суровость этих месяцев.

В апреле площадь ледяного покрова в СЛО достигает максимума и составляет в среднем около 12000 тыс. км² (см. табл. 1). В мае начинается уменьшение площади льда за счет процессов теплового разрушения и таяния, а также в результате его выноса, главным образом через пролив Фрама. В сентябре таяние и сокращение ледяного покрова прекращается. В среднем площадь остаточных льдов в сентябре составляет около 6000 тыс. км² (см. табл. 1). Массив льдов, сохранившийся после летнего разрушения и таяния, состоит преимущественно из старых и однолетних остаточных льдов.

Однако, как следует из характера межгодовой изменчивости площади ледяного покрова и плотности распределения его среднегодового количества (см. рис. 1 и 3), рассмотрение только среднемноголетнего сезонного хода площади льда недостаточно для понимания происходящих в СЛО изменений. Период повышенной ледовитости, наблюдавшийся в 70–80-х гг. прошлого столетия, и ускоряющееся сокращение площади морского льда, хорошо проявившееся в последнее десятилетие, вызывает необходимость рассматривать эти периоды по отдельности.

На Рисунке 5 приводится среднемноголетний сезонный ход изменения площади ледяного массива в СЛО за весь ряд наблюдений, а также за характерные 10-летние периоды. Для первого периода с 1979 по 1988 гг. характерна повышенная площадь льда (поэтому мы будем называть его десятилетием повышенной ледовитости), а для второго с 2009 по 2018 гг. — напротив, пониженная площадь ледяного покрова (обозначим его десятилетием пониженной ледовитости).

Вид сезонного хода за весь ряд наблюдений не изменился (см. рис. 5). Для последнего десятилетия также характерны три основных периода: весенне-летний, осенне-зимний и зимний. Но по сравнению с периодом повышенной ледовитости, в 2009–2018 гг. отмечается существенное уменьшение общей площади льда, участвующих в сезонном ледовом балансе как в зимний, так и в летний период, причем наблюдаемое уменьшение обшей площади льдов в различные сезоны года происходит неравномерно.

В десятилетие повышенной ледовитости площадь льда на период максимального нарастания (в апреле) в среднем увеличивается до 12288 тыс. км², а в десятилетие пониженной ледовитости — до 11691 тыс. км². Уменьшение общей площади льда в зимний период составляет около 600 тыс. км² или 5% общего количества льда.

Максимальное сокращение ледяного покрова в сентябре в десятилетие повышенной ледовитости (в сентябре) в среднем достигает 7208 тыс. км², а в десятилетие пониженной ледовитости — 4676 тыс. км². Площадь остаточных льдов в конце летнего периода таяния уменьшается на 2500 тыс. км², что равняется 35% общего количества льда.

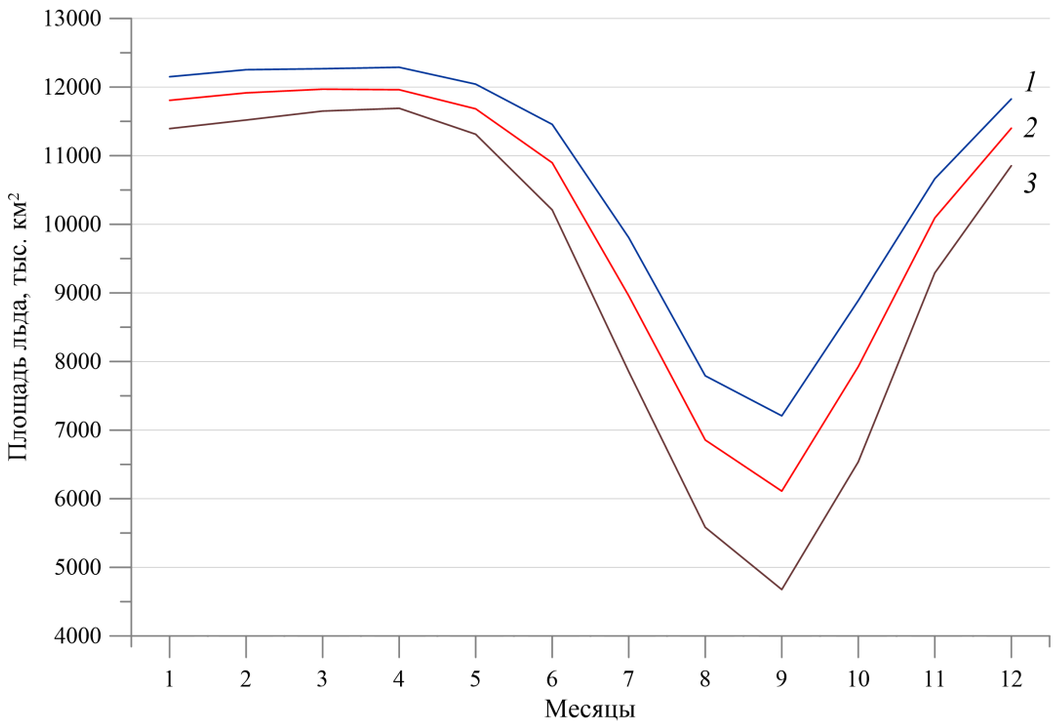

Рисунок 5 — Сезонный ход изменения площади льда в СЛО: 1 — за весь период спутниковых наблюдений 1978–2018 гг., 2 — за десятилетие повышенной ледовитости 1979–1988 гг., 3 — за десятилетие пониженной ледовитости 2009–2018 гг.

Существенные изменения произошли в количестве льда, исчезающих и появляющихся в течение сезонного хода.

За период 1979–1988 гг. площадь льда с 12288 тыс. км² в апреле уменьшилась до 7208 тыс. км² в сентябре, или на 5080 тыс. км². Приблизительно на такое же количество площадь льда увеличилась осенью и зимой.

В 2009–2018 гг. площадь льдов с 11691 тыс. км² в апреле сократилась до 4676 тыс. км² в сентябре, или на 7015 тыс. км². Примерно настолько же км² возросла площадь льда в осенне-зимний период.

Площадь акватории океана, на которой в сезонном цикле ледяной покров начал исчезать в летний и появляться в осенне-зимний период, за последнее десятилетие возросла на 2000 тыс. км² (на 38%).

Таким образом, выделим два важных изменения в сезонном ходе изменения площади льдов в СЛО за последнее десятилетие пониженной ледовитости:

- общая площадь льдов в течение всего года изменилась в сторону уменьшения, но неравномерно по сезонам года: на 5% в осенне-зимний и на 35% в весенне-летний период;
- площадь льдов, участвующих в ледовом балансе, и соответственно площадь акватории океана, ежегодно очищающейся в летний и покрывающейся льдом в осенне-зимний период, возросла с 5000 до 7000 тыс. км² или почти на 2000 тыс. км² (на 38%).

Для более детального понимания произошедших перемен необходимо рассмотреть интенсивность изменения площади льда в сезонном цикле, т.е. разность между её значениями за предыдущий и последующий месяц. Интенсивность изменения является информативным показателем динамики нарастания или уменьшения площади льда.

На Рисунке 6 приводится среднемесячный сезонный ход интенсивности изменения площади ледяного покрова за десятилетия повышенной и пониженной ледовитости, а также разности между ними.

В период с января по апрель ход интенсивности изменения площади льда за рассматриваемые десятилетия практически не изменяется. В 2009–2018 гг. в этот период года также наблюдается незначительно увеличение площади льда в СЛО, не превышающее 100 тыс. км² (менее 1% от площади в этот период).

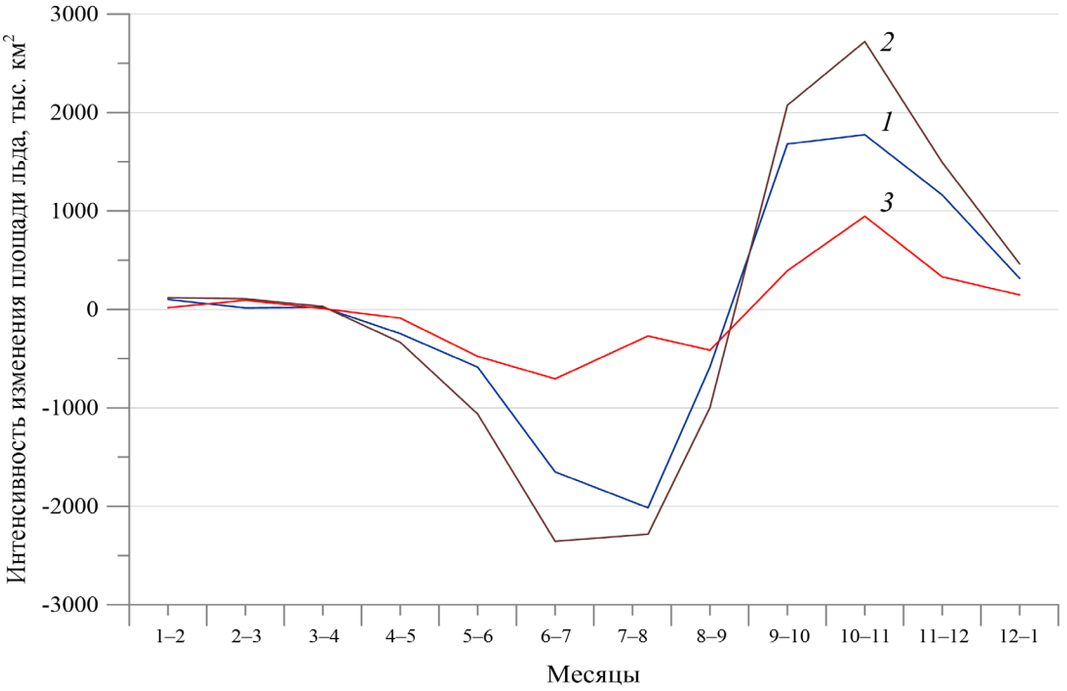

Рисунок 6 — Средний сезонный ход интенсивности изменения площади льдов в СЛО: 1 — за десятилетние повышенной ледовитости 1979–1988 гг., 2 — за последнее десятилетие пониженной ледовитости 2009–2018 гг. 3 — разности между ними.

В период весенне-летнего таяния и сокращения площади, начиная с апреля–мая, в изменении площади льда начинают проявляться существенные различия. В последнее десятилетие уменьшение площади льдов происходит раньше и интенсивнее, чем в десятилетие повышенной ледовитости.

Также в 2009–2018 гг. существенно возросла (по модулю) величина интенсивности изменения площади льдов между июнем и июлем. На этот период сместился пик уменьшения площади льда до –2355 тыс. км², который в 1979–1988 гг. приходился на июль–август и составлял –2015 тыс. км² (см. кривую 2 на рис. 6). Величина интенсивности изменения площади льда увеличилась (по модулю) между всеми месяцами весенне-летнего периода, от –88 тыс. км² между апрелем и маем до –300...–700 тыс. км² между остальными месяцами (см. кривую 3 на рис. 6). В итоге за весенне-летний период в последнее десятилетие наблюдалось более значительное уменьшение площади льда в летний период. Если в период десятилетия повышенной ледовитости общее сокращение площади льда составило в среднем около –5000 тыс. км², то в последнее десятилетие пониженной ледовитости сокращение стало глубже и достигло почти –7000 тыс. км². Увеличение площади таяния ледяного покрова и увеличение площади очищающейся акватории океана в летний период превысило 2 млн км². Необходимо особо отметить, что те льды, которые стали дополнительно таять в СЛО, представляют собой однолетние средние и толстые льды в диапазоне толщины 100–150 см и старые льды (толщиной более 150 см) [8].

Свидетельством значительного изменения интенсивности таяния площади льда в летний период в последнее десятилетие является наблюдавшиеся в 2007 и 2012 гг. абсолютные минимумы площади, когда только за один месяц (между июнем и июлем в 2007 г. и июлем и августом в 2012 г.) она уменьшилась на –2780 и –2799 тыс. км² соответственно.

Следует принять во внимание, что это ожидаемый результат действия происходящего потепления, который подтверждается величиной сокращения площади льда в СЛО в межгодовом и сезонном ходе.

В осенне-зимний период, с сентября по декабрь, начинается увеличение площади льда в результате процесса ледообразования. В последнее десятилетие увеличение площади льдов начало происходить интенсивнее и больше, чем в десятилетие повышенной ледовитости.

В 2009–2018 гг. наблюдалось значительное увеличение интенсивности нарастания площади льда между всеми месяцами осенне-зимнего периода (см. кривую 2 на рис. 6). На период между октябрем и ноябрем приходился пик увеличения интенсивности, который достигал 2721 тыс. км². В 1979–1988 гг. пик увеличения площади льда также приходился на этот период, но по величине составлял только 1775 тыс. км². Таким образом, увеличение интенсивности нарастания площади льда только между октябрем–ноябрем в последнее десятилетие возросло почти на один млн. км² (947 тыс. км²).

Интенсивность увеличения площади льдов увеличилась в последнее десятилетие между всеми месяцами осенне-зимнего периода, от 148 тыс. км² до 947 тыс. км², что в итоге привело к более значительному увеличению площади льда в СЛО почти на 2 млн. км² (см. кривую 3 на рис. 6). Появившийся новый ледяной покров представляет собой преимущественно начальные и молодые льды.

Тем не менее, это увеличение интенсивности нарастания площади льда в осенне-зимний период за последнее десятилетие свидетельствует о быстром расходе теплозапаса верхнего деятельного слоя океана осенью. Свидетельством такого увеличения интенсивности нарастания площади льда является наблюдавшийся в 2018 г. абсолютный максимум увеличения площади льда, когда только за один месяц между октябрем и ноябрем площадь льда увеличилась на 3477 тыс. км².

Полученные оценки таяния и нарастания ледяного покрова за десятилетие

повышенной и пониженной ледовитости позволяют в первом приближении оценить изменения возрастного состава льдов СЛО. Весь лед, сохранившийся после летнего таяния, состоит из старых и однолетних остаточных льдов, которые после начала нового ледообразования с 1 января нового года переходят в разряд двухлетних льдов. Весь молодой лед, появившийся в течение осенне-зимнего периода с декабря по январь, к концу периода нарастания будет представлять собой однолетний, преимущественно однолетний средний и толстый. Небольшое количество молодых льдов, появившиеся в весенние месяцы и не превышающие 1% от общей площади льда, представляют однолетние тонкие и молодые.

В возрастном составе льдов СЛО на период максимального нарастания (апрель) в десятилетие повышенной ледовитости наблюдалось в среднем около 7208 тыс. км² старых и двухлетних и около 5080 тыс. км² однолетних льдов (см. табл. 2), что составляет 59% и 41% соответственно.

В последнее десятилетие пониженной ледовитости на период максимального нарастания наблюдалось в среднем около 4676 тыс. км² старых и двухлетних и около 7015 тыс. км² однолетних льдов (см. табл. 2), что составляет 40% и 60% соответственно. Переход к преобладанию однолетних льдов в возрастном составе льдов в СЛО над многолетними произошел по нашим оценкам в период 2002-2004 гг. По имеющимся оценкам других авторов, соотношение возрастного состава льдов после 2004 г. между многолетними и однолетними льдами в СЛО в конце зимнего сезона кардинально изменилось и составляет примерно 33,3% и 66,7% соответственно [9], тогда как до начала 2000-х годов это соотношение было обратным [10]. Оценки достаточно близки, что подтверждает их достоверность.

Таким образом, в возрастном составе льдов СЛО произошли существенные изменения: если в период 1979–1988 гг. преобладали старые и двухлетние льды, то в последнее десятилетие 2009–2018 гг. превалировали однолетние льды осенне-зимнего образования.

Заключение

Результаты исследований показывают, что в изменении площади льда СЛО за ряд наблюдений с 1978 по 2018 гг. наблюдается значительная межгодовая изменчивость. Многолетние изменения площади льда проявляется в наличии устойчивой тенденции к уменьшению, которая хорошо аппроксимируется линейным отрицательным трендом, составляющим 40 тыс. км² в год.

Кроме того, в последнее десятилетие сокращение площади морского льда в СЛО ускорилось, особенно в летний период. Площадь акватории океана, очищающаяся в летний период таяния, возросла до 68% (2/3 акватории океана).

Сезонный ход изменения площади льда в СЛО в последнее десятилетие также претерпел существенные изменения. Общая площадь льда в течение всего года изменилась в сторону уменьшения, но крайне неравномерно по сезонам года. В осенне-зимний период площадь льда в СЛО сократилась на 600–700 тыс. км² (5% от среднемноголетнего значения), а в весенне-летний период сокращение площади оказалось более значительным и составило 2200-2500 тыс. км² (35% от среднемноголетнего значения).

Обобщим основные тенденции в изменения сезонного хода:

– в последнее десятилетие в летний период сокращение площади льда начало происходить раньше и интенсивнее, чем в десятилетие повышенной ледовитости (1979–1988 гг.);

– в последнее десятилетие (2009–2018 гг.) в осенне-зимний период увеличение площади льдов начало происходить более интенсивно и количество образовавшихся льдов существенно увеличилось, чем в десятилетие повышенной ледовитости.

Площадь участвующего в ледовом балансе льда, которая сокращается в летний и образуется в осенне-зимний период, возросла в последнее десятилетие по сравнению с десятилетием повышенной ледовитости с 5000 до 7000 тыс. км².

В возрастном составе льдов Северного Ледовитого океана произошли

существенные изменения. Если в десятилетие повышенной ледовитости (1979–1988 гг.) преобладали старые и двухлетние льды, то в последнее десятилетие (2009–2018 гг.) преобладающими льдами становятся однолетние льды осенне-зимнего образования.

В целом можно утверждать, что в изменениях площади льда в СЛО в последнее десятилетие начали проявляться значительные межгодовые и сезонные колебания от года к году, приводящие к аномальному развитию и проявлению ледовых явлений.

Благодарности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60109.

Acknowledgments.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-05-60109.

Список литературы:

1. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Научные исследования в Арктике, т. 2, Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: «Наука», 2007. 136 с.
2. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В. Эволюция площади морского ледяного покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 5–19.
3. Алексеев Г.В., Данилов А.И., Катцов В.М., С.И. Кузьмина, Н.Е. Иванов Изменения площади морских льдов Северного полушария в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 675–686.
4. Иванов В. В., Алексеев В. А., Алексеева Т. А., Колдунов Н. В., Репина И. А., Смирнов А. В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследование Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50–65.
5. Мировой центр данных по морскому льду. URL: http://wdc.aari.ru (дата обращения 11.10.2019).
6. Информационные материалы по мониторингу морского ледяного покрова Арктики и Южного Океана на основе данных ледового картирования и пассивного микроволнового зондирования SSMR SSM/I¬SSMIS¬AMSR2. URL: http://wdc.aari.ru/resources/d0042 (дата обращения 11.10.2019).
7. Захаров В.Ф. Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеоиздат, 1996. 213 с.
8. 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.
9. Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. № C07005. doi: 10.1029/2009JC005312.
10. Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Mala¬ nik J., Barrett A.P. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis // Clim. Change. 2011. doi: 10.1007/s10584011101011.

References:

1. Frolov I., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E. Smolyanitsky V. Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Centennial Ice Cover Observations. Praxis Publishing Ltd. UK, Chichester. 2009. 164 p.
2. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov N.E., Kharlanenkova N.E., Yulin A.V. Evoliutsiia ploshchadi morskogo ledianogo pokrova Arktiki v usloviiakh sovremennykh izmenenii klimata. Issledovanie Zemli iz kosmosa. Earth exploration from space. 2015, 2: 5–19. [In Russian].
3. Alekseev G.V., Danilov A.I., Ivanov N.E., Kattsov V.M., Kuz'mina S.I. Izmeneniya ploshchadi morskih l'dov Severnogo polushariya v XX i XXI vekah po dannym nablyudenij i modelirovaniya. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and Oceanic Physics. 2009, 45, 6: 675–686. [In Russian].
4. 4. Ivanov V. V., Alekseev V. A., Alekseeva T. A., Koldunov N. V., Repina I. A., Smirnov A. V. Arkticheskij ledyanoj pokrov stanovitsya sezonnym? Issledovanie Zemli iz kosmosa. Earth exploration from space. 2013, 4: 50–65. [In Russian].
5. 5. World Data Center Sea Ice file server. Available at: http://wdc.aari.ru (accessed 11.10.2019).

6. Arctic and Antarctic sea ice extent monitoring information materials based on data from ice mapping and passive microwave sounding SSMR SSM/I¬SSMIS¬AMSR2. Available at: http://wdc.aari.ru/resources/d0042 (accessed 11.10.2019).
7. Zaharov V.F. Sea Ice In the Climate System. Gidrometeoizdat. 1996. 213 p.
8. Alekseeva T.A., Serovetnikov S.S., Frolov S.V., Sokolov V.T. Ledovye usloviia plavaniia v arkticheskom basseine v letnii period 2018 goda. Rossiiskaia Arktika. Russian Arctic. 2018, 2: 31–40. [In Russian].
9. Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. № C07005. doi: 10.1029/2009JC005312.
10. Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Mala¬ nik J., Barrett A.P. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis // Clim. Change. 2011. doi: 10.1007/s1058401101011.

УДК 911.9
DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10074

РЕАЛИЗАЦИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО И ЛОГИСТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ – КАК ВЫПОЛНИТЬ «МАЙСКИЙ» УКАЗ ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ

Д.О. Фишкин[1], М.Н. Григорьев[2]

[1]Минприроды России
[2]ООО «Гекон»

dofishkin@yandex.ru, mgrigoriev@gecon.ru

Указом Президента России В.В. Путина от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» поставлена задача развития Северного морского пути и установлены показатели такого развития – обеспечение грузопотока по нему до 80 млн. тонн в год к 2024 году. Постараемся проанализировать перспективы и условия достижения определённых руководством страны целей.

Ключевые слова: Северный морской путь, грузопоток, Минерально-сырьевая база, Минерально-сырьевой центр, транспортная инфраструктура.

REALIZATION OF MINERAL RESOURCE AND LOGISTIC CAPACITY OF RUSSIA'S ARCTIC ZONE – HOW TO PERFORM THE TASKS DEFINED BY THE «MAY» DECREE OF THE PRESIDENT OF RUSSIA

D.O. Fishkin[1], M.N. Grigoriev[2]

[1]The Ministry of Natural Resources of Russia
[2]«GECON»LLC

Decree of the President of Russia Vladimir Putin of may 7, 2018 № 204 «On national goals and strategic objectives of the Russian Federation for the period up to 2024» set the task of development of the Northern sea route and set indicators of such development – ensuring the flow of cargo on it to 80 million tons per year by 2024. We will try to analyze the prospects and conditions for achieving the goals set by the country's leadership.

Keywords: Northern sea route, cargo flow, Mineral resource base, Mineral resource center, transport infrastructure.

Если оценивать объём грузовой базы Северного морского пути (СМП) к 2024 году и далее – более 96 % от неё будут формироваться за счёт реализации проектов по развитию, освоению и переработке минерально-сырьевых ресурсов.

При сохранении инерционного сценария уровень грузопотока составит 52-54 млн. тонн к 2024 году. Источниками формирования данной грузовой базы будут являться СПГ-проекты, включая добычу газового конденсата на полуостровах Ямал и Гыдан, добыча нефти на Новопортовском месторождении, твёрдые полезные ископаемые Норильского промышленного района, Якутии и Чукотского АО.

Увеличение прогнозного объема грузопотока по СМП до уровня в 80 млн. тонн в год к 2024 году возможно при своевременном вводе в действие всех планируемых к реализации проектов,

а также реализации ряда перспективных инфраструктурных проектов (в частности, подключение к СМП Сузунского, Тагульского, Лодочного нефтяных месторождений ПАО «НК «Роснефть»).

Прогнозные объемы отгрузки добываемого сырья для транспортировки через акваторию СМП оценены по четырем группам проектов, имеющим различную вероятность реализации (см. Таблица 1 и Рисунок 1): 1) проект разработки минерально-сырьевой базы (МСБ) согласован и введён в действие; 2) проект разработки МСБ согласован, ведётся строительство; 3) заявление компании-недропользователя обеспечено запасами; 4) заявление компании-недропользователя в настоящее время не обеспечено запасами.

Перспективная грузовая база Северного морского пути представлена следующими проектами освоения минерально-сырьевых ресурсов Арктики:

Углеводородное сырье

Сжиженный природный газ (СПГ)

1. Проекты «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ-2» – объемы потенциальной отгрузки сжиженного природного газа (СПГ) проектов определены исходя из свободных объемов газа, которые могут быть направлены на сжижение (определяемых как разность между проектным объемом добычи газа и объемом газа, направляемым на технологические нужды).

Нефть

2. Проект «Новопортовское» – объемы отгрузки нефти с терминала «Ворота Арктики» рассчитаны на основе совокупного прогноза добычи нефти и конденсата Новопортовского месторождения, поскольку план освоения месторождения предполагает отгрузку в качестве товарной продукции смеси сырой нефти и конденсата.
3. Проект «Бухта Север» – объемы поставки нефти рассчитаны как сумма объемов добычи на Пайяхском месторождении АО «ННК-Таймырнефтегаздобыча», Сузунском, Тагульском и Лодочном месторождениях компаний группы ПАО «НК «Роснефть», начиная с 2022 года – по мере завершения строительства нефтепровода, синхронизированного с началом добычи на Пайяхском месторождении. В объемах отгрузки учтена добыча конденсата на Тагульском и Лодочном месторождении, который поступает в нефтепровод.
4. Проект «Нумги» – объемы поставки в сезонную навигацию приняты в соответствии с проектом добычи Сандибинского месторождения, исходя из накопления полного объема добываемой нефти в береговом резервуарном парке.

Конденсат

5. Проект «Пеляткинское» – объемы поставки конденсата приняты в соответствии с согласованным проектом разработки.
6. Проект «Ямал СПГ» – объемы поставки конденсата приняты в соответствии с согласованным проектом разработки.
7. Проект «Арктик СПГ 2» – объемы поставки конденсата приняты в соответствии с согласованным проектом разработки.

Рудные концентраты

8. Проект «Норильск» (месторождения Заполярного филиала ГМК «Норильский Никель») – объем отгрузки рудного концентрата (файнштейна) и товарных металлов принят по прогнозу компании с учетом сложившихся объемов транспортировки.
9. Проект «Майское» – объем отгрузки рудного концентрата принят, исходя из средних объемов вывоза за последние три года с учетом заявления компании о продлении срока работы производства до 2034 года.
10. Проект «Павловское» – для транспортировки по Севморпути принят заявленный компанией объем транспортировки концентрата руды (свинец) в Китай в период сезонной навигации.
11. Проект «Томтор» – объем отгрузки

рудного концентрата принят по прогнозу компании-недропользователя.

12. Проект «Баимское» – объем отгрузки рудного концентрата принят по прогнозу компании-недропользователя.

Уголь

13. Проект «Зырянка» – объем отгрузки принят исходя из согласованного проекта разработки.
14. Проект «Северная Звезда» – объем отгрузки принят исходя из заявления компании с учетом его обеспеченности текущей сырьевой базой.
15. Проект «Чайка» – объем отгрузки принят в двух вариантах, исходя из заявления компании: 1 млн. т в год, обеспеченный запасами, и дополнительный объем, который пока не обеспечен текущей сырьевой базой. По мере реализации проекта предполагается рост объемов добычи и стабилизация на уровне суммарного объема 30 млн. т в год, начиная с 2026 года.

Следует отметить, что вывоз и доставка до потребителей такого объёма грузов требует своевременного строительства инфраструктуры, наличия ледокольных мощностей, транспортного флота ледового класса и пр.

Инфраструктура является ключевым фактором, обеспечивающим рентабельность реализации проектов в Арктической зоне Российской Федерации. «Устойчивое» развитие Минерально-сырьевых центров (МСЦ) в Арктике зависит от наличия как минимум 3-х из 5-ти базовых объектов инфраструктуры:

1. портовые терминалы,
2. трубопроводный транспорт,
3. железнодорожный транспорт,
4. энергетические мощности,
5. авиационный транспорт (см. Рисунок 2).

Кроме того, для зоны СМП необходимо наличие ледокольных мощностей, что, по сути, также является инфраструктурным обеспечением.

Представляется, что снизить затраты на реализацию проектов возможно при их взаимоувязке и «удовлетворении» консолидированных потребностей в создании инфраструктуры (то есть для группы проектов).

Таким образом, исходя из общего инфраструктурного обеспечения, можно выделить 7 проектов (групп проектов).

1. **Морской порт Сабетта и порты Обской губы (Новый порт, нефтеналивной пункт Нумги), ЯНАО.**

Проекты: «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ- 2», развитие кластера производства СПГ на месторождениях полуостровов Ямал и Гыдан, Новопортовское нефтегазоконденсатное месторождение, Сандибинское нефтяное месторождение. На днях НОВАТЭК заявил о планах строительства еще одного производства – Обского СПГ, технологические мощности которого будут размещены в непосредственной близости от «Ямал СПГ».

Объём разведанных и неразрабатываемых запасов, а также имеющийся ресурсный потенциал распределённого и нераспределённого государственного фонда недр в пределах северной части полуострова Ямал, прилегающей к нему мелководной части Карского моря и полуострова Гыдан, при их целевом использовании позволяют обеспечить ресурсной базой газа кластер производства СПГ мощностью до 140 млн. тонн в год при условии активного вовлечения участков ПАО «Газпром».

Необходимое инфраструктурное обеспечение:

- требуется своевременное завершение строительства «Кольской верфи»;
- расширение судоходного морского канала в Обской губе;
- дноуглубление акватории и строительство морского терминала «Утренний»;
- строительство перегрузочных комплексов СПГ в Мурманской области и на Камчатке;
- обеспечение ледокольного сопровождения и ввод новых ледокольных мощностей по мере реализации проектов;
- обеспечение флотом грузовых и портовых судов;

- строительство железнодорожной ветки «Обская-Бованенково-Сабетта» (СШХ-2).

2. Морской порт Диксон, Красноярский край («бухта Север», «Северная Звезда», «Чайка»).

Проекты: Пайяхское нефтяное месторождение (АО «Нефтегазхолдинг»), Сузунское, Тагульское и Лодочное месторождения (ПАО «НК «Роснефть»), Сарыдасайское угольное месторождение (ООО «Северная Звезда» Корпорации «AEON»), месторождение угля Малолемберовское (УК «ВостокУголь»).

Необходимо проведение комплекса геологоразведочных работ, подтверждение ресурсной базы месторождений и создание региональной производственной инфраструктуры.

Требуется также энергетическое обеспечение проектов.

Необходимое инфраструктурное обеспечение:

- строительство морского терминала в бухте Север;
- строительство морского угольного терминала на базе Сарыдасайского угольного месторождения;
- строительство морского угольного терминала Чайка;
- строительство нефтепроводов «Ванкорский кластер – Пайяхское месторождение» и «Пайяхское месторождение – бухта Север».

3. Морской порт Дудинка, Красноярский край.

Проекты: развитие Норильского промышленного района, Пеляткинское газоконденсатное месторождение (ПАО «ГМК «Норильский никель»).

Развитие добычи конденсата связано с добычей природного газа, обеспечивающего потребления Норильского промышленного района.

4. Морской порт Индига, Ненецкий АО.

Проект создания круглогодичного морского порта Индига, а также железнодорожной ветки к нему (которая свяжет СМП с Уралом и Центральной Азией) в стадии формирования. Подключение к проекту новой грузовой базы регионов России и стран Центральной Азии, а также новых месторождений на территории Ненецкого автономного округа (требуются ГРР) даст дополнительную грузовую базу СМП.

Ближайшую перспективу имеет проект «Северной звезды» по перевалке угля с челночных балкеров арктических ледовых классов на конвенциональные суда без ледовых усилений в районе порта Индига.

5. Хатангский морской порт (Красноярский край), морской порт Тикси, бухта Нордвик и терминал Зелёный Мыс (Северная Якутия).

Проекты: Томторское месторождение редкоземельных металлов («ТриАрк Майнинг» – СП ГК «Ростех» и ICT Group), месторождение каменного угля Надеждинское (АО «Зырянский угольный разрез), Хатангский и Западно-Анабарский перспективные нефтяные МСЦ, последующее вовлечение месторождений олова и золота бассейна р. Яна и пр.

Необходимо проведение дополнительных ГРР и геолого-экономическая оценка выявленной ресурсной базы.

Энергетическое обеспечение проектов возможно в том числе за счёт вовлечения местных источников: использование нефти и газа перспективных Западно-Анабарской и Прончищевской площадей; угля «Зырянского угольного разреза».

Необходимое инфраструктурное обеспечение:

- проведение проектно-изыскательских работ для выбора оптимальной схемы транспортировки сырья Томторского месторождения – Хатанский морской порт, бухта Нордвик, Тикси.
- строительство судов ледового класса и класса река-море.
- могут потребоваться дноуглубительные работы.

6. Морской порт Певек, Чукотский АО.

Проекты: Месторождения Баимской рудной зоны (медь, золото) и Ичувеем-Паляваамского золоторудного района.

Энергетическое обеспечение за счёт плавучей атомной теплоэлектростанции

(ПАТЭС) «Академик Ломоносов».

Необходимое инфраструктурное обеспечение:

- реконструкция порта Певек;
- строительство автодороги от месторождения Песчанка (ООО «Баимская ГДК» компании KAZ Minerals) до п. Певек;
- строительство хранилища концентрата и дополнительных погрузочных мощностей в порту Певек;
- строительство взлетно-посадочной полосы;
- строительство ЛЭП 220 кВ «Омсукчан – ПП – Песчанка» от п. Омсукчан (Магаданская обл.) до месторождения Песчанка, протяженностью 741 км, передаваемой мощностью 200 МВт и 2-х цепная ВЛ 220 кВ «Песчанка-Усть-Среднеканская ГЭС».

7. **Проект «Павловское», архипелаг Новая Земля (часть продукции планируется к транспортировке по СМП).**

Строительство Горно-обогатительного комбината на базе месторождения свинцово-цинковых руд Павловское (АО «Первая горнорудная компания» АО «Атомредметзолото» горнорудного дивизиона ГК «Росатом»).

Необходимо строительство портового комплекса на острове Южный архипелага Новая Земля.

Как видим, реализация положений «майского» Указа Президента России в части развития Северного морского пути потребует скоординированной работы заинтересованных федеральных органов исполнительной власти, государственных корпораций, субъектов Российской Федерации, компаний-недропользователей и компаний-грузоперевозчиков (см. Рисунок 3).

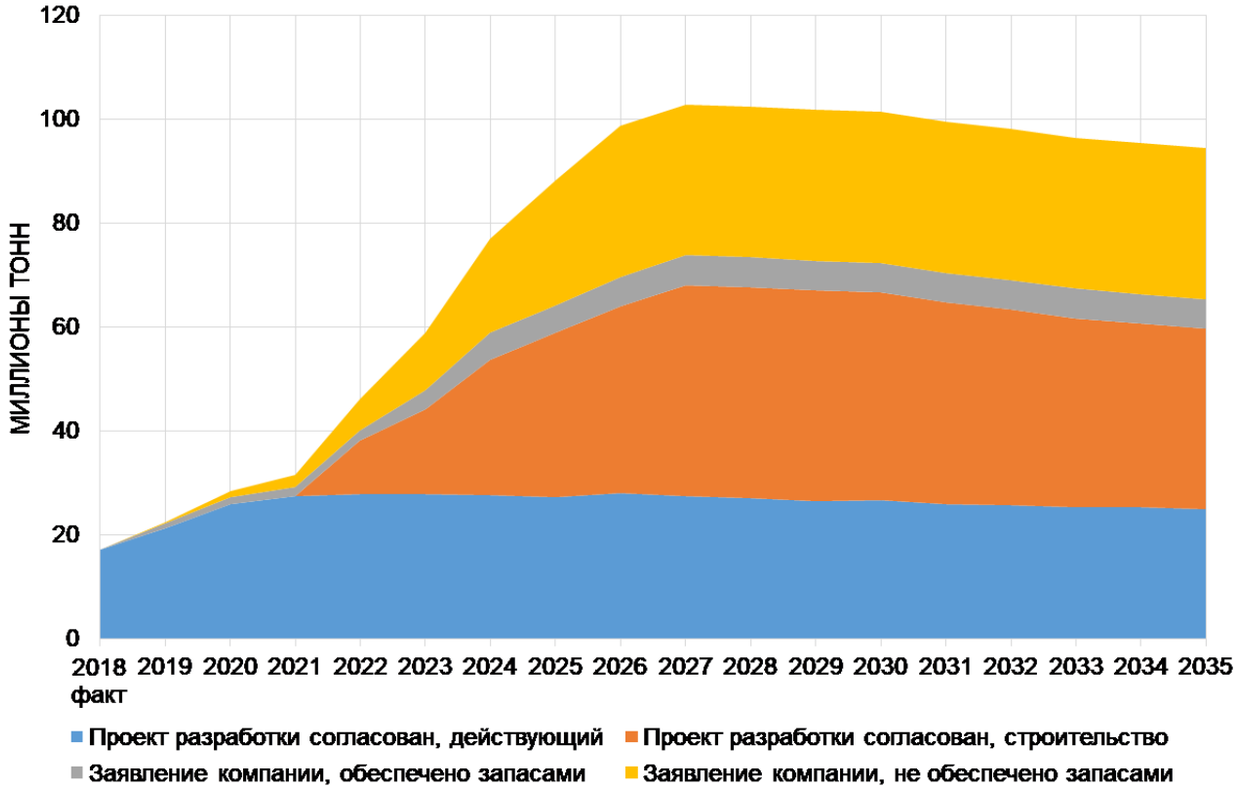

Рисунок 1 — Разделение прогнозных объёмов добываемого сырья для транспортировки через акваторию СМП на 4 группы в зависимости от вероятности реализации.

Рисунок 2 — «Устойчивое» развитие МСЦ в Арктике зависит от наличия минимум 3- х из 5-ти базовых объектов инфраструктуры: (1) портовые терминалы, (2) трубопроводный транспорт, (3) железнодорожный транспорт, (5) авиационный транспорт, (4) энергетические мощности.

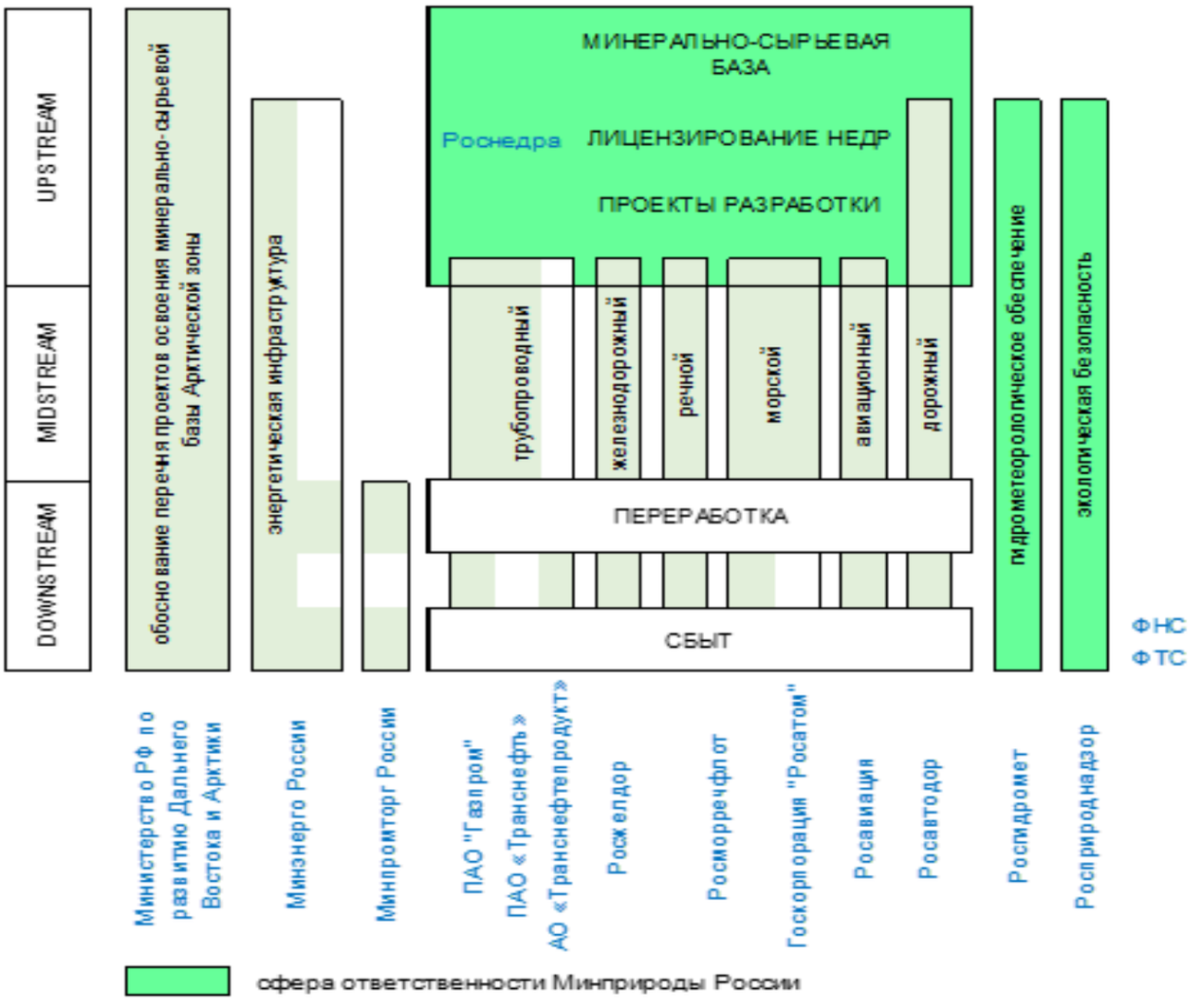

Рисунок 3 — Принципиальная схема участия федеральных органов исполнительной власти, госкорпораций и акционерных обществ с государственным участием.

Таблица 1

Прогноз грузопотока минерального сырья в акватории СМП (млн т) на основании утверждённых проектов разработки месторождений.

Группы проектов по степени обоснованности прогноза грузопотока	Сумма по группам в 2024 г.	Проект	Порт	Груз	Грузопоток минерального сырья, млн тонн									Навигация по СМП
					2018 факт	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2030	2035	
Проект разработки согласован, действующий	28	Новопортовское	Сабетта, уч. №3	нефть	7,1	7,0	6,6	6,7	6,8	6,8	6,4	5,7	5,0	круглогод.
		Ямал СПГ	Сабетта, уч. №1	СПГ	8,4	12,3	17,0	18,2	18,6	18,5	18,8	19,0	18,3	круглогод.
		Ямал СПГ	Сабетта, уч. №1	конденсат	0,7	0,9	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,0	0,9	круглогод.
		Норильск	Дудинка	руды Cu Ni	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	круглогод.
		Пеляткинское	Дудинка	конденсат	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	круглогод.
		Нумги	Нумги	нефть	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Сезонная
		Майское	Певек	руды Au	0,04	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	Сезонная
		Зырянка	Зеленый Мыс	уголь	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0	Сезонная
Проект разработки согласован, строительство	26	Арктик СПГ 2	Сабетта, уч. №2	СПГ						3,0	10,1	21,2	21,2	круглогод.
		Арктик СПГ 2	Сабетта, уч. №2	конденсат						0,3	1,0	1,2	1,0	круглогод.
		бухта Север	Диксон	нефть					10,3	13,1	14,9	17,5	12,5	круглогод.
Заявление компании, обеспечено запасами	5	Северная Звезда	Диксон	уголь			0,3	0,8	0,8	2,0	3,5	3,5	3,5	круглогод.
		Томтор	Хатанга	руды TR						0,2	0,2	0,2	0,2	Сезонная
		Баимское	Певек	руды Cu						0,5	0,5	1,0	1,0	неопредел.
		Павловское	б. Безымянная	руды Pb						0,05	0,05	0,05	0,05	сезонная
					0,04	1	1	1	1	1	1	1	1	
Заявление компании, не обеспечено запасами	18	Чайка	Диксон	уголь		0	1	3	6	11	18	29	29	круглогод.
Всего	77			Всего	17	22	28	32	46	59	77	101	94	
Проект разработки согласован, действующий					17	21	26	27	28	28	28	27	25	
Проект разработки согласован, строительство					0	0	0	0	10	16	26	40	35	
Заявление компании, обеспечено запасами					0	1	1	2	2	4	5	6	6	
Заявление компании, не обеспечено запасами					0	0	1	3	6	11	18	29	29	

Список литературы:

1. Проект «Ямал СПГ». URL: http://www.novatek.ru/ru/business/yamal-lng/
2. «Новатэк» назвал сроки запуска третьего СПГ-завода // «Ведомости» от 21.05.2019 URL: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2019/05/21/802066-novatek
3. Стратегия ПАО «ГМК «Норильский никель» URL: https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/cmd/2018/20181229-Strategy_Update_2018_FINAL-RUS.pdf
4. Проект «Новый порт». URL: https://www.gazprom-neft.ru/company/business/exploration-and-production/new-projects/new-port/
5. ПАО «НК «РОСНЕФТЬ», Разведка и добыча URL: https://www.rosneft.ru/business/Upstream/Overview/
6. Нефтяные адмиралы. «Роснефть» намерена загрузить Севморпуть сырьем со своих месторождений // «Коммерсантъ» от 28.02.2019 URL: https://www.kommersant.ru/doc/3896485
7. «Роснефть» хочет добывать 100 млн. тонн на Таймыре // «Коммерсантъ» от 01.04.2019 URL: https://www.kommersant.ru/doc/3930878
8. Миллиард тонн прогнозов. «Нефтегазхолдинг» ставит на баланс запасы крупнейшего нефтяного месторождения // «Коммерсантъ» от 06.05.2019 URL: https://www.kommersant.ru/doc/3961873
9. Минприроды нашло способ выполнить указ Путина по загрузке Севморпути // РБК от 13.03.2019 URL: https://www.rbc.ru/business/13/03/2019/5c87d7af9a7947460fcfc78e
10. Триллион заложат за полярный круг. Росморречфлот подготовил план развития Севморпути // «Коммерсантъ» от 21.01.2019 URL: https://www.kommersant.ru/doc/3859550
11. М.Н. Григорьев, Условия раскрытия ресурсного потенциала Арктики // «Бурение и нефть» 07-08/2017
12. М.Н. Григорьев, Прогноз развития минерально-сырьевых центров нефти и газа Арктической зоны с морской схемой транспортировки // Neftegaz.RU Offshore №5/2018
13. Д.О. Фишкин, Нестандартные подходы к высоким широтам // «Нефтегазовая Вертикаль» 02.03.2017
14. Д.О. Фишкин, «В Арктике нет альтернатив планово-проектному подходу к социально-экономическому развитию» // «Нефтегазовая Вертикаль» 11.05.2018

References:

1. The project “Yamal LNG”. URL: http://www.novatek.ru/ru/business/yamal-lng/
2. “NOVATEK” called the timing of the launch of the third LNG plant // «Vedomosti» 2019.05.21 URL: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2019/05/21/802066-novatek
3. The strategy of PJSC “MMC “Norilsk Nickel” URL: https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/cmd/2018/20181229-Strategy_Update_2018_FINAL-RUS.pdf
4. The project “New port”. URL: https://www.gazprom-neft.ru/company/business/exploration-and-production/new-projects/new-port/
5. PJSC “NC “ROSNEFT”, Upstream URL: https://www.rosneft.ru/business/Upstream/Overview/
6. Oil admirals. “Rosneft” intends to load the Northern sea route with raw materials from its fields // «Kommersant» 2019.02.28 URL: https://www.kommersant.ru/doc/3896485
7. “Rosneft” wants to produce 100 million tons on the Taimyr Peninsula // «Kommersant « 2019.04.01 URL: https://www.kommersant.ru/doc/3930878
8. Billion tons of forecasts. “Neftegazholding” puts on balance the reserves of the largest oil field // «Kommersant» 2019.05.06 URL: https://www.kommersant.ru/doc/3961873
9. The Ministry of natural resources found a way to execute Putin’s decree on loading the Northern sea route // RBC 2019.03.13 URL: https://www.rbc.ru/business/13/03/2019/5c87d7af9a7947460fcfc78e
10. A trillion will be laid for the Arctic circle. The Federal Agency for Maritime and River Transport prepared a plan for the development of the Northern sea route // «Kommersant» 2019.01.21 URL: https://www.kommersant.ru/doc/3859550
11. M.N. Grigoriev, Conditions of development of resource potential of the Arctic // «Drilling and oil» 07-08/2017
12. M.N. Grigoriev, Forecast of development of mineral resource centers of oil and gas of the Arctic zone with marine transportation scheme // Neftegaz.RU Offshore #5/2018
13. D.O. Fishkin, Non-standard approaches to high latitudes // «Oil And Gas Vertical» 2017.03.02
14. D.O. Fishkin, “In the Arctic, there are no alternatives to the planned project approach to socio-economic development” // «Oil And Gas Vertical» 2018.05.11

УДК 551.551.8
DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10075

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В ЛЕТНЕЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД

И.А. Репина[1,2], А.Ю. Артамонов[1], М.И. Варенцов[2,1], Е.М. Хавина[3]

[1]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
[2]Московский государственный университет имени. М.В. Ломоносова
[3]Московский физико-технический институт

✉ *repina@ifaran.ru, arseniy@ifaran.ru, mvar91@gmail.com, khavina.lx@gmail.com*

Одним из основных вопросов проблемы взаимодействия океана и атмосферы является описание процессов энергомассобмена. В наиболее сложном виде эти процессы представлены в Арктическом бассейне, так как ледяной покров определяет изменение альбедо, потоки тепла и влаги, а также динамическое взаимодействие между океаном и атмосферой. В работе представлены результаты экспериментальных исследований турбулентного взаимодействия атмосферы и морской поверхности в летний и осенний период в центральных и шельфовых зонах Северного Ледовитого океана. Сравнение судовых наблюдений с данными реанализа и мезомасштабного моделирования показывает, что реанализы плохо воспроизводят турбулентные потоки в северной полярной области, особенно в осенний период. Это связано как с недостаточной разработанностью параметризаций для определения коэффициентов обмена в алгоритмах расчета турбулентных потоков, так и со сложностью определения температуры поверхности, покрытой льдом различной сплоченности.

Ключевые слова: взаимодействие атмосферы и океана, турбулентные потоки тепла, морской лед, реанализы.

AIR-SEA INTERACTION IN THE ARCTIC OCEAN FROM MEASUREMENTS IN THE SUMMER-AUTUMN PERIOD

I.A. Repina[1,2], A.Yu. Artamonov[3], M.I. Varentsov[2,1], E.M. Khavina[3]

[1]A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,
[2]M.V. Lomonosov Moscow State University
[3]Moscow Institute of Physics and Technology

One of the main issues of the problem of the air-sea interaction is the description of energy and mass transfer processes. In the most complex form, its processes are presented in the Arctic basin, since the ice cover determines the albedo change, heat and moisture fluxes, as well as the dynamic interaction between the ocean and the atmosphere. The paper presents the results of experimental studies of the turbulent air-sea interaction in the summer and autumn in the central and shelf zones of the Arctic Ocean. A comparison of ship observations with reanalysis and mesoscale modeling data shows that reanalyses poorly reproduce turbulent flows in the northern polar region, especially in the autumn period. This is due to both the insufficient development of the parameterizations for determining the exchange coefficients in the algorithms for calculating turbulent flows, and the difficulty in determining the temperature of the surface covered with ice of various concentrations.

Keywords: air-sea interaction, turbulent heat fluxes, sea ice, reanalysis.

Введение

Мелкомасштабные процессы, не представляемые явно в климатических или региональных моделях с разрешением от 1 до 100 км, играют ключевую роль в системе взаимодействия «атмосфера-лёд-океан» в полярных районах.

Эти процессы включают турбулентное перемешивание в атмосфере и океане; микрофизику облаков и аэрозолей; радиационный перенос в атмосфере, через лёд и снег и в верхнем слое океана; турбулентный обмен импульсом, теплом и веществом в системе океан-лёд-снег-атмосфера; мелкомасштабные процессы в морском льду; нарастание и таяние льда; влияние топографии в прибрежных зонах и на континентальном шельфе на динамику океана и атмосферы [1]. Именно подсеточные процессы вносят основной вклад в полярное усиление – наблюдаемое в настоящее время более быстрое потепление в Арктике в сравнении с другими регионами [2-5]. С другой стороны, недостаточно надежные параметризации мелкомасштабных явлений служат основной причиной ошибок климатических и региональных моделей в определении теплового баланса Арктики. Комплексные эксперименты последних десятилетий собрали значительный фактический материал о характеристиках энергообмена в полярных районах [6-8]. Но даже такой значительный эксперимент как SHEBA (Surface Heat Budget of the Arctic Ocean) так и не дал ответа на вопрос как уменьшить расхождение модельных и экспериментальных данных в определении турбулентных потоков в полярных районах [9,10].

Основная причина ошибок моделей и реанализов заключается в том, что при моделировании погоды и климата в Арктике используются параметризации подсеточных процессов, разработанные для средних широт. Но структура пограничных слоев в атмосфере и океане в Арктике имеет определенные особенности в сравнении со средними и тропическими (субтропическими) широтами. Прежде всего, в Арктике в зимний период наблюдается долгоживущий устойчивый атмосферный пограничный слой (АПС), который по своей структуре отличается от ночного устойчивого АПС средних широт [11]. Арктический АПС более подвержен влиянию движения внутренних гравитационных волн, в нем формируются долгоживущие температурные, ветровые и влажностные инверсии. Также полярным регионам свойственна поверхность сложной структуры: здесь присутствуют льды различной толщины, покрытые торосами, снежницами, гладкие и со снежным покровом; полыньи и трещины различной протяженности; большие участки открытой воды во взволнованном состоянии [12]. В результате, воздушный поток, переходя с одной поверхности на другую, трансформируется, и возникает сложная система внутренних пограничных слоев. Обменные процессы зависят от сплоченности, толщины льда, степени его заснеженности и всторошенности, направления воздушного потока, площади полыней и трещин, наличия поземки и многих других часто трудно-формализуемых факторов [13]. Хотя Арктический пограничный слой, как правило, имеет устойчивую или нейтральную стратификацию, конвективные пограничные слои тоже являются важной характеристикой Арктической атмосферы. Обычно они образуются при чередовании льда и открытой воды, что приводит к сильным градиентам температуры в приземном слое атмосферы. Влияние участков открытой воды на атмосферу сильно зависит от сезона – оно более выражено зимой, чем летом [14, 15]. Конвекция возникает над разводьями, полыньями и над открытым океаном при холодных вторжениях. Так как эти процессы сильно отличаются по масштабам, требуется разработка специальных параметризаций для каждой структуры. Разводья вносят значительный вклад в тепловой баланс Арктики в зимний период [16], но теплоотдача через них зависит не только от общей площади, но и от их конфигурации [17, 18] – перенос тепла через небольшие разводья более эффективен, чем через широкие и протяженные. Неотъемлемой особенностью арктических морей являются так называемые заприпайные полыньи [19, 20].

Они систематически образуются в зимний период между неподвижным припаем и сплоченными дрейфующими льдами и представляют собой значительные пространства чистой воды и молодых льдов толщиной до 30 см. В результате отдачи тепла в атмосферу в полыньях происходит интенсивное ледообразование, которое, в свою очередь, приводит к формированию уплотненной воды, влияющей на гидрологические процессы на шельфе [21]. Конвективные процессы над полыньями влияют на температурную структуру АПС, его динамику [22, 23], на облакообразование. Но турбулентные потоки зависят от направления ветра, конфигурации края полыньи и расстояния от края. В отличие от разводий и полыней, развитая атмосферная конвекция в Арктике возникает только при холодных вторжениях в прикромочной зоне морских льдов [24]. Зоны с экстремальными значениями потоков тепла из океана охватывают большие пространства, что приводит к формированию мезомасштабных циркуляций, в том числе полярных мезоциклонов, изменению теплового и ветрового режима АПС.

Следовательно, ледяной покров определяет изменение альбедо, потоки тепла и влаги, а также динамическое взаимодействие между океаном и атмосферой [25, 26]. Полярной зимой лед препятствует теплообмену, но при наличии участков открытой воды (полыней, разводий) из-за большой разницы температур вода-воздух турбулентные потоки тепла возрастают в десятки раз [23, 27]. На формирование термического режима приводного слоя атмосферы существенное влияние оказывают и фазовые превращения на поверхности океана, связанные с замерзанием водной поверхности и таянием льдов. При экспериментальном изучении теплового баланса Арктики, особенно в случае полыней, разводий и молодых льдов, окруженных многолетним ледяным полем, особую трудность представляет определение вертикальных турбулентных потоков тепла и влаги. В настоящее время общепринятыми являются так называемые аэродинамические балк-формулы, которые используют стандартные метеорологические характеристики и эмпирические коэффициенты обмена [28]. В свою очередь, данные коэффициенты обмена зависят как от метеорологических условий, так и от состояния поверхности.

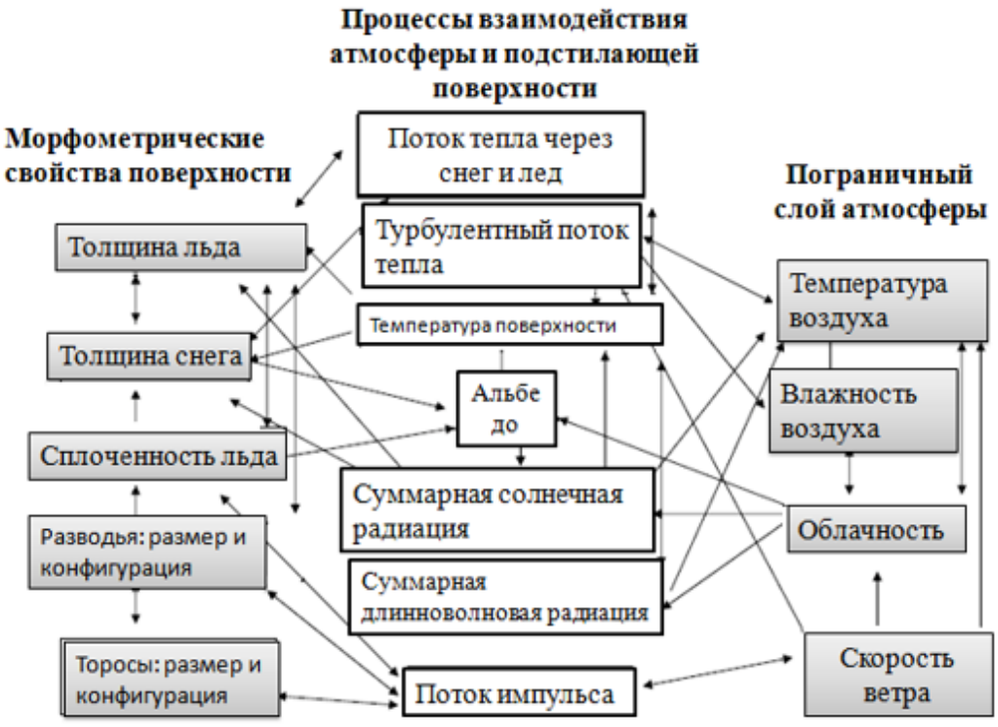

Рисунок 1 — Процессы взаимодействия атмосферы и покрытой льдом поверхности в Арктике.

На рисунке 1 представлена диаграмма взаимосвязи структуры поверхности, характеристик атмосферного пограничного слоя и обменных процессов в Арктике: различные процессы связаны не только с процессами в другой системе, но и между собой внутри одной системы. Параметризация этих связей представляется достаточно сложной задачей.

Разработка параметризаций обменных процессов в Арктике основана на моделировании и данных специализированных экспериментов. Поэтому крайне важным является проведение комплексных экспериментов по исследованию энергетического баланса над различными поверхностями и при различных фоновых условиях.

Экспериментальные исследования теплового баланса в Арктике

Для анализа используются данные экспериментальных наблюдений характеристик энергообмена в Арктике в период с 2004 по 2015 гг. в рамках международного проекта NABOS (Nansen and Amundsen basin observation system), главная задача которого состоит в исследовании роли процессов трансформации Атлантических вод по пути их распространения в Северном Ледовитом океане вдоль границы материкового склона Арктического бассейна в северных частях морей Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского в формировании современных климатических изменений в Арктике [29]. Но атмосферные исследования также являются важной составной частью проводимых в рамках проекта экспедиций. В их процессе проводилось непрерывное измерение составляющих энергетического баланса в приводном слое атмосферы, а также анализ энергообмена атмосферы и подстилающей поверхности при различных метеоусловиях и условиях атмосферной стратификации с помощью инструментальных измерений потоков тепла, влаги, импульса и радиационного обмена в приповерхностном слое атмосферы. В основном, измерения проводились в центральных районах Арктики на границах континентального шельфа. В период с 2004 по 2009 год работы велись с борта ледокола «Капитан Драницын», в 2013 году использовалось научно-экспедиционное судно (НЭС) «Академик Федоров», а в 2015 – НЭС «Академик Трешников». Исследования проводились в августе-сентябре, за исключением 2008 года, когда экспедиция проходила в октябре. Ледовые условия в этот период года характеризуются разнообразными типами льда: образующиеся начальные и молодые льды, однолетние и многолетние льды, льды покрытые торосами и снежницами, льды с разводьями. Стратификация атмосферы в это время, как правило, нейтральная или неустойчивая. Над полями многолетнего льда в холодные дни наблюдались и устойчивые пограничные слои.

Измерения атмосферных параметров проходили непрерывно по всему маршруту экспедиций, в том числе и на ледовых станциях. Для вычисления турбулентных потоков скрытого и явного тепла и импульса использовался метод турбулентных пульсаций (Eddy-covariance) [30]. При вычислении потоков применялись спектральная коррекция; коррекция акустической температуры; коррекция наклона анемометра. Для проверки качества получаемых данных использовался спектральный анализ и статистические тесты. Интервал осреднения брался 20 мин с 10-минутным смещением. Для коррекции движения судна использовался метод, изложенный в работе Edson J.B. и др., 1998 [31]. Скрытый поток тепла или поток влаги либо измерялся напрямую (2005-2009), либо рассчитывался профильным методом (2013, 2014) [32, 33].

В таблице 1 приведены статистические характеристики потоков тепла и влаги, полученные в разные годы.

На рисунке 2 показано распределение значений потоков явного и скрытого тепла за период 2004-2009, 2013, 2015 годы в море Лаптевых в периоды наблюдений. В основном, среднее значение потоков близко к нулю с преобладанием слабонеустойчивых условий, что связано с наличием снежниц на поверхности льда и более тёплой, чем воздух температурой поверхности открытой воды в этот

Таблица 1

Статистические характеристики турбулентных потоков тепла и влаги в центральных районах Арктики в период 2004-2015 гг. по данным судовых наблюдений.

Годы	2004 сентябрь	2005 август-сентябрь	2006 август-сентябрь	2007 сентябрь	2008 октябрь	2009 август	2013 сентябрь	2015 сентябрь
Поток явного тепла H Вт/м2								
Мин	-24.9	-31.7	-22.7	-12.3	-70.4	-24.4	-26.5	-12.9
Макс	111.4	73.7	91.5	125.6	239.5	63.6	49.7	102.2
Среднее	4.4	5.5	21.0	25.7	31.0	9.2	1.3	26.5
STD	16.9	17.5	24.4	23.3	49.5	13.9	8.3	16.6
Поток скрытого тепла (влаги) LH Вт/м2								
Мин		-13.0	-0.3	0.3	-16.1	-12.9	-11.1	-3.7
Макс		56.4	110.5	135.8	84.2	65.0	41.6	128.4
Среднее		9.8	24.3	38.7	19.9	11.6	5.4	26.6
STD		12.7	23.9	26.7	17.4	13.6	6.5	21.9

период года. Наибольшие разбросы значений и положительные величины потоков явного и скрытого тепла наблюдались в 2007, 2008 и 2015 годах.

В 2007 году все измерения проводились над открытой водой, температура которой была выше, чем температура воздуха. В тот год наблюдался первый минимум площади ледяного покрова, океан аккумулировал значительное количество тепла – и ледообразование началось позже, чем в предыдущие годы. В 2008 году при низких температурах и начале интенсивного позднего ледообразования наблюдалось разнообразие ледовых условий с преобладанием зон разводий, что и объясняет преимущественно положительные потоки тепла. В 2006 году при относительно низких температурах маршрут судна проходил через ледяные поля, покрытые снежницами и разводьями, что и объясняет преимущественно положительные потоки тепла. В 2015 году положительные потоки тепла и влаги были вызваны синоптической ситуацией, а именно адвекцией холодных воздушных масс с покрытой льдом поверхности океана на относительно теплую открытую поверхность. Это привело к интенсификации теплообмена в приповерхностном слое атмосферы: вклад турбулентного обмена по сравнению с наблюдениями в том же регионе в 2013 году увеличился в несколько раз. Соответственно, увеличился и общий тепловой баланс [34, 35]. Приведенный анализ показывает, что основное влияние на тепловой баланс в Арктике оказывают два фактора: наличие открытой воды в осенне-зимний период и синоптические условия (холодные и теплые вторжения в прикромочной зоне морских льдов).

Данных экспериментальных наблюдений состояния атмосферы в Арктике, особенно в центральной ее части, по-прежнему крайне мало. Поэтому для исследования климатической изменчивости используются атмосферные реанализы. Было проведено сравнение судовых измерений вдоль маршрутов судна с данными основных реанализов:

NCEP-NCAR (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html),

ERA-Interim (http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/),

ASR (Arctic System Reanalysis, http://rda.ucar.edu/datasets/ds631.0/).

Arctic System Reanalysis (ASR) – региональный реанализ, полученный с

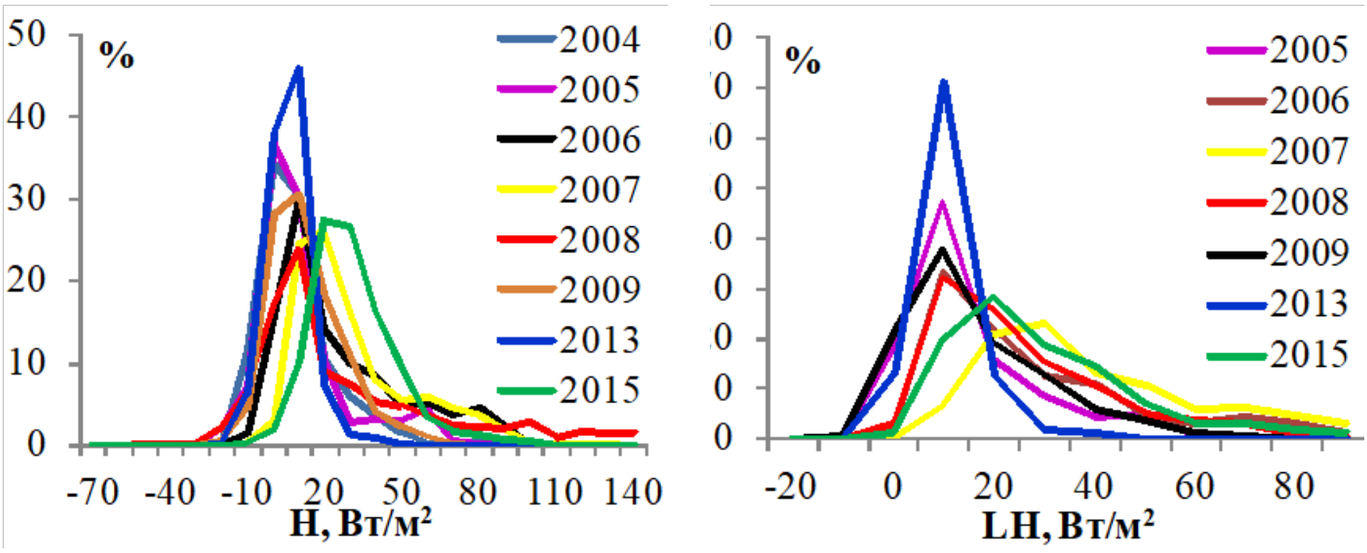

Рисунок 2 — Распределение значений потоков явного и скрытого тепла за период 2004-2008 годы в море Лаптевых в летне-осенний период.

помощью динамического даунскейлинга глобального реанализа ERA-Interim моделью PWRF (Polar Weather Forecast Model) с использованием оптимизированной для Арктики системы усвоения данных для охватывающего большую часть северного полушария домена [14, 36].

Также использовалась региональная мезомасштабная негидростатическая модель атмосферы COSMO-CLM [37] климатическая версия модели COSMO, разрабатываемая одноименным консорциумом (Consortium for Small-cale Modeling) во главе с немецкой службой погоды DWD (Deutscher Wetter Dienst) и свободно распространяемая для научного использования в рамках сообщества CLM (Climate Limited-area Modelling Community, ww.clm-community.eu).

Для сравнения использовались данные наблюдений, наиболее близкие по времени к расчетному времени реанализа по маршруту движения судна, проходящему через ячейку реанализа.

На рисунке 3 приведены результаты сравнения данных измерений турбулентных потоков тепла (H) и влаги (LH) по маршруту судна с реанализами. Для анализа взято два года: 2008 и 2013. В 2013 году наблюдалась небольшая изменчивость потоков и их значения, в основном, были близки к нулю, в 2008 году, напротив, значения потоков были большие из-за холодных условий и движения судна в зоне разводий.

В оба года и реанализы, и мезомасштабные модели дают ошибки в определении потоков, особенно значимые при неустойчивой стратификации атмосферы. В 2008 году наблюдалось регулярное значительное занижение потоков реанализами. Правда, здесь необходимо учитывать, что при движении во льдах судно выбирает оптимальный маршрут следования через зоны разводий – и интегральная сплоченность ледяного покрова и, соответственно, температура поверхности в ячейке реанализа может отличаться от условий по маршруту движения судна.

Для расчета потоков в реанализах применяется алгоритм COARE (https://coaps.fsu.edu/COARE/flux_algor/), в последние версии которого включены параметризации для расчета турбулентных потоков надо льдом и в штормовых условиях при наличии пены и брызг [38]. Входными данными для алгоритма служат метеорологические данные, полученные из реанализа.

Для определения применимости алгоритма COARE при расчете потоков в Арктике, потоки, полученные из судовых измерений, сравнивались с потоками, рассчитанными по версии COARE-3 с использованием получаемой в экспедициях метеорологической информации. Температура поверхности измерялась с помощью ИК-радиометра.

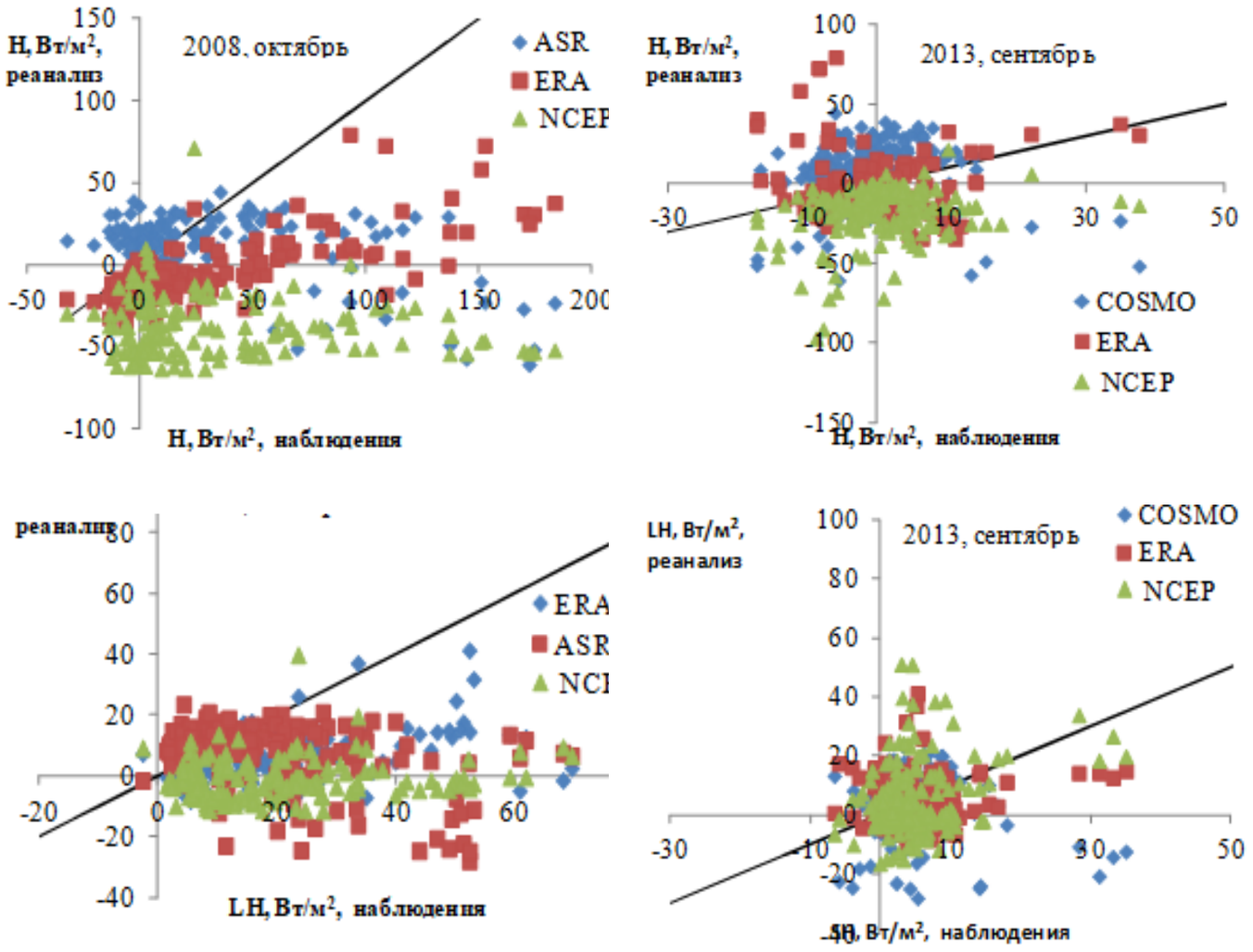

Рисунок 3 — Сравнения данных измерений турбулентных потоков тепла (H) и влаги (LH) по маршруту движения судна с реанализами.

В таблице 2 приведены коэффициенты корреляции рассчитанных и измеренных потоков явного и скрытого тепла по всему массиву данных, разделенных по скоростям ветра и условиям стратификации, а также по типу подстилающей поверхности (открытая вода, лёд). В большинстве случаев уровень значимости корреляции не ниже 90%. Алгоритм хорошо воспроизводит потоки как над водой, так и надо льдом при умеренных скоростях ветра и стратификации близкой к нейтральной. При сильных и слабых ветрах, а также при наличии стратификации ошибки алгоритма увеличиваются, но все равно коэффициенты корреляции больше, чем при сравнении с данными реанализов. Над открытой водой во всех случаях алгоритм работает лучше, чем над покрытой льдом поверхностью. Следовательно, причина больших расхождений не в качестве используемых параметризаций.

Проведем сравнение скорости приземного ветра и температур поверхности и приземного воздуха по данным судовых измерений и реанализов. Ошибки, сравнимые с наблюдаемыми в Арктике трендами, в воспроизведении основных метеорологических полей реанализами отмечались и ранее [10, 39, 40]. В нашем случае (Рис. 4) скорость ветра и приземная температура во все годы восстанавливается достаточно хорошо. Реанализы занижают приземную скорость ветра при сильных ветрах и дают ошибки как в сторону завышения так и занижения при низких отрицательных температурах.

Но при воспроизведении температуры поверхности уровень ошибок вырастает (Рис 4-в). И если в случаях открытой воды или сплошного льда данные наблюдений и реанализа практически совпадают, то в случае неоднородных ледяных массивов и в прикромочных зонах разброс очень велик. Это связано, как уже говорилось ранее, с выбором оптимального

Таблица 2

Коэффициенты корреляции рассчитанных и измеренных потоков явного и скрытого тепла при различных условиях.

Скорость Ветра, м/с (количество случаев)	Поток тепла, H		Поток влаги LH	
	COARE вода	COARE лёд	COARE вода	COARE лёд
0-5 (325)	0.68	0.63	0.65	0.52
5-15 (687)	0.88	0.86	0.87	0.85
>15 (83)	0.57	0.38	0.51	0.41
Параметр устойчивости $\xi=z/L$				
$0.05 < \xi$ (305)	0.52	0.48	0.58	0.43
$-0.05 < \xi < 0.05$ (685)	0.87	0.8	0.82	0.79
$\xi < -0.05$ (413)	0.7	0.63	0.71	0.62

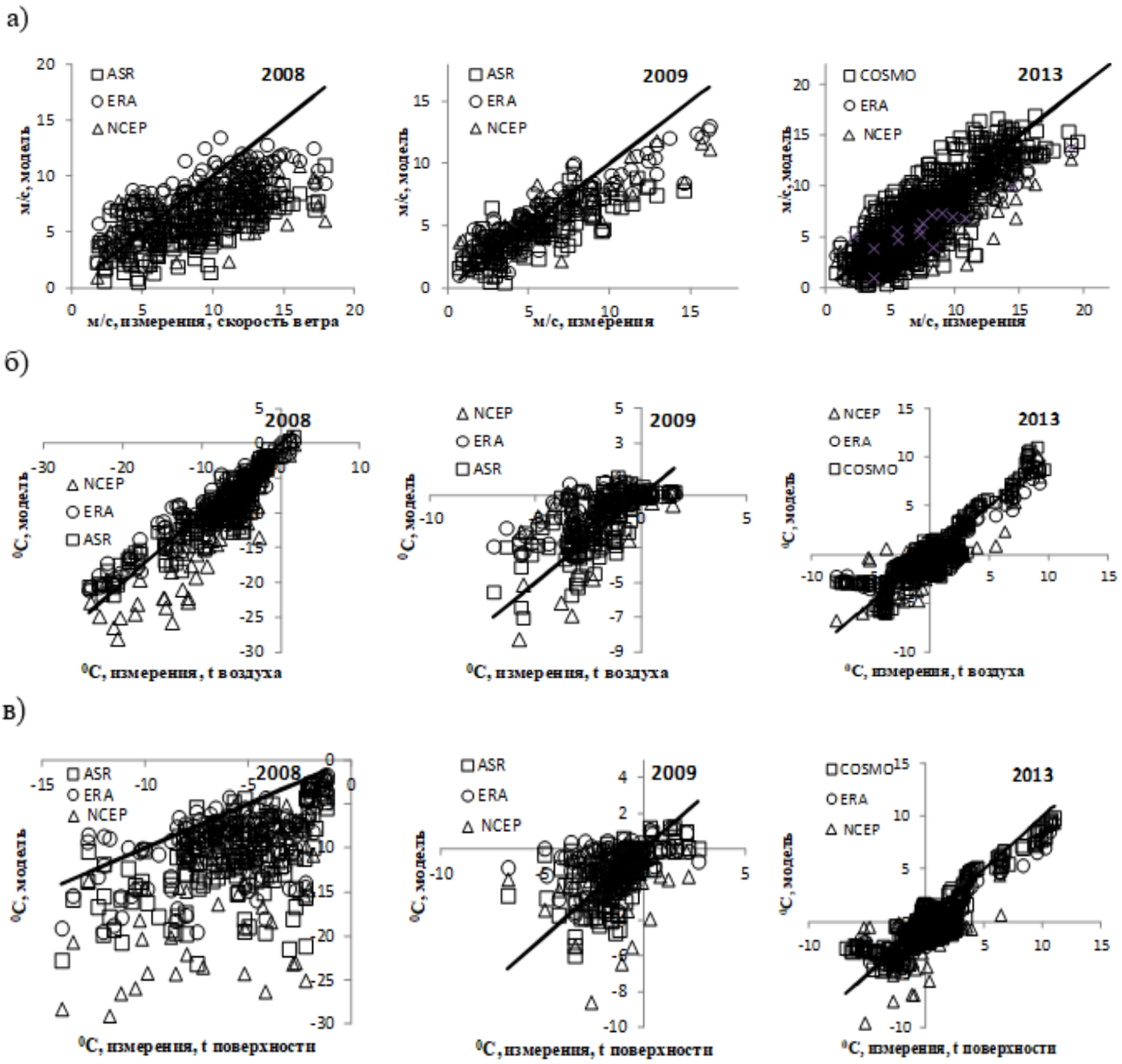

Рисунок 4 — Сравнение судовых измерений с данными реанализов и мезомасштабного моделирования за октябрь 2008, август 2009 и сентябрь 2013. а) скорость приводного ветра, б) температура воздуха на высоте 2 м., г) температура поверхности.

маршрута движения судна в зоне разводий. Но также и с ошибками в восстановлении сплоченности морского льда по спутниковым данным, которая используется для восстановления температуры покрытой льдом морской поверхности [41,42].

На рис. 5 приведено сравнение результатов расчетов среднесуточного потока тепла с использованием данных о сплоченности льда по различным алгоритмам и данных визуальных наблюдений, полученных во время работ на ледоколе «Капитан Драницын» в октябре 2008 года. Видно, что значения потоков, особенно в прикромочной зоне, могут различаться более чем на порядок.

Заключение

Настоящая статья представляет результаты прямых измерений характеристик энергообмена над различными типами льда в центральных и прибрежных районах Арктики в летний и осенний периоды. Установлено, что в осенне-зимний период влияние толщины и сплоченности льда на турбулентный энергообмен в атмосфере может быть значительным. Над участками открытой воды и тонкого молодого льда вклад турбулентного обмена в тепловой баланс превосходит радиационный. Наблюдается положительный поток тепла над зонами разводий и отрицательный над многолетними льдами. Поток тепла оказывается зависим от наличия пространственных неоднородностей на поверхности льда – торосов, снежниц, разводий и пр. Усиление турбулентного энергообмена наблюдается в прикромочной зоне, что приводит к интенсификации атмосферных процессов в прикромочной зоне в осенний период.

Сравнение судовых наблюдений с данными реанализа и мезомасштабного моделирования показывает, что реанализы плохо воспроизводят турбулентные потоки в северной полярной области, особенно в осенний период. Это связано как с недостаточной разработанностью параметризаций для определения коэффициентов обмена в алгоритмах расчета турбулентных потоков, так и со сложностью определения температуры поверхности, покрытой льдом различной сплоченности.

Благодарности.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 17-05-01221 и 18-05-60184.

Acknowledgments.

The reported study was funded by RFBR according to the research projects № 17-05-01221 and 18-05-60184.

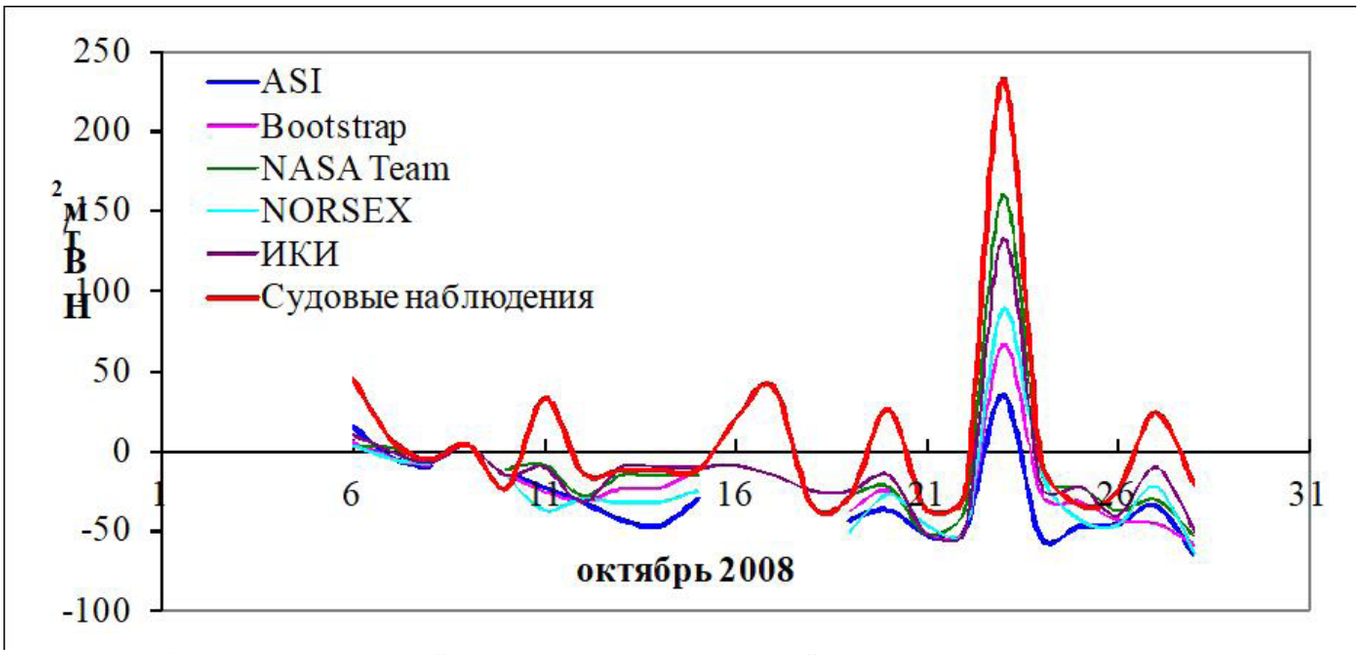

Рисунок 5 — Среднесуточный поток тепла, расчитанный с использованием данных о сплоченности ледяного покрова, полученных из визуальных судовых наблюдений и различных алгоритмов обработки спутниковых пассивных микроволновых данных.

Список литературы:

1. Vihma T., Pirazzini R., Fer I., Renfrew I.A., Sedlar J., Tjernström M., Lüpkes C., Nygård T., Notz D., Weiss J., Marsan D., Cheng B., Birnbaum G., Gerland S., Chechin D., Gascard J.C. Advances in understanding and parameterization of small-scale physical processes in the marine Arctic climate system: a review // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14. P. 9403–9450.
2. Flanner M.G., Shell K.M., Barlage M., Perovich D.K., Tschudi M.A.: Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008 // Nature Geosci. 2011. V. 4. P. 151–155.
3. Graversen R.G., Wang M. Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo // Clim. Dynam. 2009. V. 33. P. 629–643.
4. Graversen R.G., Mauritsen T., Tjernström M., Källen E., Svensson, G. Vertical structure of recent Arctic warming // Nature. 2008. V. 451. P. 53–56.
5. Hudson S.R. Estimating the global radiative impact of the sea ice–albedo feedback in the Arctic // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. D16102.
6. Andreas E.L., Jordan R.E., Makshtas A.P. Parameterizing turbulent exchange over sea ice: the ice station Weddell results // Boundary Layer Meteorology. 2005.V. 114.P. 439-460.
7. Jordan R.E., Andreas E.L., Makshtas A.P. The heat budget of snow-covered sea ice at North Pole 4 // Journal of Geophysical Research. 1999.V. 104. P.7785-7806.
8. Persson P.O.G., Fairall C.W., Andreas E.L., Guest P.S., Perovich D.K. Measurement near the Atmospheric Surface Flux Group tower at SHEBA: near surface conditions and surface energy budget // J. Geophys. Res. 2002.V.107 (C10).
9. Beesley J.A., Bretherton C.S., Jakob C, Andreas E.L., Intrieri J.L., Uttal T.A. A comparison of the cloud and boundary layer variables in the ECMWF forecast model with observations at SHEBA ice camp.// Journal of Geophysical Research. 2000. Vol.105. N12. P.337-12349.
10. Chaudhuri A.H., Ponte R.M., Nguyen A.T. A comparison of atmospheric reanalysis products for the Arctic Ocean and implications for uncertainties in air–sea fluxes // Journal of Climate. 2014. V. 27(14). P.5411-5421.
11. Zilitinkevich S.S., Esau I.N. Resistance and heat-transfer laws for stable and neutral planetary boundary layers: old theory advanced and re-evaluated // Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 2005. V. 131. P. 1863–1892.
12. Lüpkes C., Gryanik V.M., Rösel A., Birnbaum G., Kaleschke L. Effect of sea ice morphology during Arctic summer on atmospheric drag coefficients used in climate models // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40(2). P. 446-451.
13. Волков Ю.А., Репина И.А. Влияние структуры подстилающей поверхности в полярных районах на энергообмен атмосферы и океана // Поверхностные и внутренние волны в арктических морях. Спб.: Гидрометеоиздат, 2002. Гл. 11. С. 189-206.
14. Bromvich D.H., Hines K.M., Bai L.S. Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting Model: 2. Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. D08122.
15. Kay J.E., Raeder K., Gettelman A., Anderson J. The boundary layer response to recent Arctic sea ice loss and implications for high-latitude climate feedbacks // J. Climate, 2011. V.24, P. 428–447.
16. Lüpkes C., Vihma T., Birnbaum G., Wacker U. Influence of leads in sea ice on the temperature of the atmospheric boundary layer during polar night // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L03805.
17. Esau I.N. Amplification of turbulent exchange over wide Arctic leads: large-eddy simulation study // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. D08109.
18. Marcq S., Weiss, J. Influence of sea ice lead-width distribution on turbulent heat transfer between the ocean and the atmosphere // The Cryopshere. 2012. V. 6. P. 143–156.
19. Атлас ледяных образований. Под общей редакцией В.М. Смоляницкого СПб.: ААНИИ, 2019. 232 с.
20. Tamura T., Ohshima K.I. Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. No. C07030.
21. Ivanov V.V., Golovin P.N. Observations and modelling of dense water cascading from the Laptev Sea shelf // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. C09003. P. 1-15.
22. Репина И.А., Аниферов А.А. Исследование динамики атмосферного пограничного слоя над заприпайной полыньей моря Лаптевых по данным WRF-моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 275–288.
23. Репина И.А., Чечин Д.Г. Влияние полыней и разводий в Арктике на структуру атмосферного пограничного слоя и региональный климат // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. № 4. С. 162-172.
24. Chechin D.G., Lüpkes C., Repina I.A., Gryanik V.M. Idealized dry quasi 2-D mesoscale simulations of cold-air outbreaks over the marginal sea ice zone with fine and coarse resolution // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. P. 8787–8813.
25. Репина И.А., Артамонов А.Ю., Смирнов А.С., Чечин Д.Г. Исследование взаимодействия океана и атмосферы в полярных районах в рамках международного полярного года // Метеорологические и геофизические исследования. Под ред. Г.В. Алексеева. М. - СПб., 2011. С. 236–250.
26. Макштас А.П. Тепловой баланс Арктических льдов в зимний период. / Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 87 с.
27. Maykut C.A. Energy exchange over young sea ice in the central Arctic // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 3646-3658.
28. Репина И.А., Смирнов А.С. Обмен теплом и

импульсом между атмосферой и льдом по данным наблюдений в районе Земли Франца-Иосифа // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2000. Т.36. №5. С. 672-680.
29. Polyakov I.V., Alexeev V.A., Ashik I.M., Bacon S., Beszczynska-Möller A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fortier L., Gascard J.-C., Hansen E., Hölemann J., Ivanov V.V., Kikuchi T., Kirillov S., Lenn Y.-D., McLaughlin F.A., Piechura J., Repina I., Timokhov L.A., Walczowski W., Woodgate R. Fate of early 2000s arctic warm water pulse // Bulletin of the American Meteorological Society. 2011. Vol. 92. № 5. P. 561-566.
30. Burba G. Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: a Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates. LI-COR Biosciences, Lincoln, USA. 2013. 331 p.
31. Edson J.B., Hinton A.A., Prada K.E., Hare J.E., Fairall C.W. Direct Covariance Flux Estimates from Mobile Platforms at sea // J. Atmos. Oceanic Technol. 1998. V.15. P. 547-562.
32. Репина И.А. Методы определения турбулентных потоков над морской поверхностью. / Москва: ИКИ РАН, 2007. 36 с.
33. Тимачев В.Ф., Иванов Б.В., Репина И.А, Теплообмен между атмосферой и ледовым покровом // Труды ААНИИ. 2008. В.447. С.140-155.
34. Варенцов М.И., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Хавина Е.М., Матвеева Т.А. Экспериментальные исследования энергообмена и динамики атмосферного пограничного слоя в Арктике в летний период // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 361. С. 95-127.
35. Ivanov V., Varentsov M., Matveeva T., Repina I., Artamonov A., Khavina E. Arctic Sea Ice Decline in the 2010s. The Increasing Role of the Ocean – Air Heat Exchange in the Late Summer // Atmosphere. 2019. Vol. 10, no. 4. P. 184(1) –184(23).
36. Wilson A.B., Bromwich D.H., Hines K.M. Evaluation of Polar WRF forecasts on the Arctic System Reanalysis Domain: 2. Atmospheric hydrologic cycle // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. D04107.
37. Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM - the climate version of LM: Brief description and long-term applications // COSMO Newsletter. 2006. V. 6. P. 225-235.
38. Fairall C., Bradley E., Hare J., Grachev A., Edson J. Bulk parameterizations of air–sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm // J. Climate. 2003. V. 16. P. 571–591.
39. Jakobson E., Vihma T., Palo T., Jakobson L., Keernik H., Jaagus J.: Validation of atmospheric reanalyzes over the central Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L10802.
40. Lüpkes C., Vihma T., Jakobson E., König-Langlo G., Tetzlaff A. Meteorological observations from ship cruises during summer 2 to the central Arctic: A comparison with reanalysis data // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. L09810.
41. Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Репина И.А., Комарова Н.Ю. Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов. Обзор. // Исследование Земли из космоса. V. 2016. № 4. С. 65–84.
42. Ivanova N.O., Johannessen M., Pedersen L.T., Tonboe R.T. Retrieval of Arctic sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: A comparison of eleven sea ice concentration algorithms // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2014. V. 52. №11. P. 7233–7246.

References:

1. Vihma T., Pirazzini R., Fer I., Renfrew I.A., Sedlar J., Tjernström M., Lüpkes C., Nygård T., Notz D., Weiss J., Marsan D., Cheng B., Birnbaum G., Gerland S., Chechin D., Gascard J.C. Advances in understanding and parameterization of small-scale physical processes in the marine Arctic climate system: a review // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14. P. 9403–9450.
2. Flanner M.G., Shell K.M., Barlage M., Perovich D.K., Tschudi M.A.: Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008 // Nature Geosci. 2011. V. 4. P. 151–155.
3. Graversen R.G., Wang M. Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo // Clim. Dynam. 2009. V. 33. P. 629–643.
4. Graversen R.G., Mauritsen T., Tjernström M., Källen E., Svensson, G. Vertical structure of recent Arctic warming // Nature. 2008. V. 451. P. 53–56.
5. Hudson S.R. Estimating the global radiative impact of the sea ice–albedo feedback in the Arctic // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. D16102.
6. Andreas E.L., Jordan R.E., Makshtas A.P. Parameterizing turbulent exchange over sea ice: the ice station Weddell results // Boundary Layer Meteorology. 2005.V. 114.P. 439-460.
7. Jordan R.E., Andreas E.L., Makshtas A.P. The heat budget of snow-covered sea ice at North Pole 4 // Journal of Geophysical Research. 1999.V. 104. P.7785-7806.
8. Persson P.O.G., Fairall C.W., Andreas E.L., Guest P.S., Perovich D.K. Measurement near the Atmospheric Surface Flux Group tower at SHEBA: near surface conditions and surface energy budget // J. Geophys. Res. 2002.V.107 (C10).
9. Beesley J.A., Bretherton C.S., Jakob C, Andreas E.L., Intrieri J.L., Uttal T.A. A comparison of the cloud and boundary layer variables in the ECMWF forecast model with observations at SHEBA ice camp.// Journal of Geophysical Research. 2000. Vol.105. N12. P.337-12349.
10. Chaudhuri A.H., Ponte R.M., Nguyen A.T. A comparison of atmospheric reanalysis products

for the Arctic Ocean and implications for uncertainties in air–sea fluxes // Journal of Climate. 2014. V. 27(14). P.5411-5421.
11. Zilitinkevich S.S., Esau I.N. Resistance and heat-transfer laws for stable and neutral planetary boundary layers: old theory advanced and re-evaluated // Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 2005. V. 131. P. 1863–1892.
12. Lüpkes C., Gryanik V.M., Rösel A., Birnbaum G., Kaleschke L. Effect of sea ice morphology during Arctic summer on atmospheric drag coefficients used in climate models // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40(2). P. 446-451.
13. Yu.A. Volkov, I. A. Repina Air-sea interaction in the polar in the polar regions. DOI: 10.29006/978-5-9901449-3-4-2017-1-140-143
14. Bromvich D.H., Hines K.M., Bai L.S. Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting Model: 2. Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. D08122.
15. Kay J.E., Raeder K., Gettelman A., Anderson J. The boundary layer response to recent Arctic sea ice loss and implications for high-latitude climate feedbacks // J. Climate, 2011. V.24, P. 428–447.
16. Lüpkes C., Vihma T., Birnbaum G., Wacker U. Influence of leads in sea ice on the temperature of the atmospheric boundary layer during polar night // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L03805.
17. Esau I.N. Amplification of turbulent exchange over wide Arctic leads: large-eddy simulation study // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. D08109.
18. Marcq S., Weiss, J. Influence of sea ice lead-width distribution on turbulent heat transfer between the ocean and the atmosphere // The Cryopshere. 2012. V. 6. P. 143–156.
19. Smolyanitsky, V.A. (Eds.). (2019). Atlas of ice formations. St. Petersburg.: AARI, p. 232.
20. Tamura T., Ohshima K.I. Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. No. C07030.
21. Ivanov V.V., Golovin P.N. Observations and modelling of dense water cascading from the Laptev Sea shelf // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. C09003. P. 1-15.
22. Repina , I.A., Aniferov, A.A. (2018). Issledovaniye dinamiki atmosfernogo pogranichnogo sloya nad zapripaynoy polyn'yey morya Laptevykh po dannym WRF-modelirovaniya [The study of the dynamics of the atmospheric boundary layer above the pan-ice polynya of the Laptev Sea according to WRF-modeling]. Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa - Modern problems of remote sensing of the Earth from space. Vol. 15, . № 1. pp. 275–288.
23. Repina, I.A. & Chechin, D.G. (2012) Vliyaniye polyney i razvodiy v Arktike na strukturu atmosfernogo pogranichnogo sloya i regional'nyy klimat [The influence of wormwood and scatter in the Arctic on the structure of the atmospheric boundary layer and regional climate]. Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa - Modern problems of remote sensing of the Earth from space. Vol. 4. Pp. 162-172.
24. Chechin D.G., Lüpkes C., Repina I.A., Gryanik V.M. Idealized dry quasi 2-D mesoscale simulations of cold-air outbreaks over the marginal sea ice zone with fine and coarse resolution // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. P. 8787–8813.
25. Repina, I.A. & Artamonov, A.Yu. & Smitnov, A.S. & Chechin, D.G. (2011). The study of the interaction of the ocean and the atmosphere in the polar regions within the framework of the international polar year. G.V. Alekseev (Ed.). Moscow-St.Peterburg: Meteorological and geophysical studies. Pp. 236–250.
26. Makshtas, A.P. (1984) Thermal balance of Arctic ice in winter. L.: Gidometizdat. p. 87.
27. Maykut C.A. Energy exchange over young sea ice in the central Arctic // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 3646-3658.
28. Repina, I.A. & Smirnov, A.S. (2000). Obmen teplom i impul'som mezhdu atmosferoy i l'dom po dannym nablyudeniy v rayone Zemli Frantsa-Iosifa [The exchange of heat and momentum between the atmosphere and ice according to observations in the Franz Josef Land region]. Izvestiya RAN, Fizika atmosfery i okeana - Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics of the atmosphere and ocean. Vol. 36. №5. Pp. 672-680.
29. Polyakov I.V., Alexeev V.A., Ashik I.M., Bacon S., Beszczynska-Möller A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fortier L., Gascard J.-C., Hansen E., Hölemann J., Ivanov V.V., Kikuchi T., Kirillov S., Lenn Y.-D., McLaughlin F.A., Piechura J., Repina I., Timokhov L.A., Walczowski W., Woodgate R. Fate of early 2000s arctic warm water pulse // Bulletin of the American Meteorological Society. 2011. Vol. 92. № 5. P. 561-566.
30. Burba G. Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: a Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates. LI-COR Biosciences, Lincoln, USA. 2013. 331 p.
31. Edson J.B., Hinton A.A., Prada K.E., Hare J.E., Fairall C.W. Direct Covariance Flux Estimates from Mobile Platforms at sea // J. Atmos. Oceanic Technol. 1998. V.15. P. 547-562.
32. Repina, I.A. (2007). Methods for determining turbulent flows over the sea surface. Moscow: IKI RAS, p. 36.
33. Timachev, V.F. & Ivanov, B.V. & Repina, I.A. (2008).Teploobmen mezhdu atmosferoy i ledovym pokrovom [Heat transfer between the atmosphere and ice cover]. Trudy AANII - ARII studies. Vol. .447. P.140-155.
34. Varentsov, M.I. & Repina I.A. & Artamonov, A.Yu. & Khavina. E.M. & Matveeva, T.A. (2016). Experimental studies of energy transfer and the dynamics of the atmospheric boundary layer in the Arctic in the summer // Transactions of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation. Vol. 361. S. 95-127.
35. Ivanov V., Varentsov M., Matveeva T., Repina I., Artamonov A., Khavina E. Arctic Sea Ice Decline

in the 2010s. The Increasing Role of the Ocean – Air Heat Exchange in the Late Summer // Atmosphere. 2019. Vol. 10, no. 4. P. 184(1) –184(23).
36. Wilson A.B., Bromwich D.H., Hines K.M. Evaluation of Polar WRF forecasts on the Arctic System Reanalysis Domain: 2. Atmospheric hydrologic cycle // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. D04107.
37. Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM - the climate version of LM: Brief description and long-term applications // COSMO Newsletter. 2006. V. 6. P. 225-235.
38. Fairall C., Bradley E., Hare J., Grachev A., Edson J. Bulk parameterizations of air–sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm // J. Climate. 2003. V. 16. P. 571–591.
39. Jakobson E., Vihma T., Palo T., Jakobson L., Keernik H., Jaagus J.: Validation of atmospheric reanalyzes over the central Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L10802.
40. Lüpkes C., Vihma T., Jakobson E., König-Langlo G., Tetzlaff A. Meteorological observations from ship cruises during summer 2 to the central Arctic: A comparison with reanalysis data // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. L09810.
41. Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarsky D.A., Repina I.A., Komarova N.Yu. Satellite microwave radiometry of sea ice in the polar regions. Overview. // Exploration of the Earth from space. V. 2016. No. 4. C. 65–84.Ivanova N.O., Johannessen M., Pedersen L.T., Tonboe R.T. Retrieval of Arctic sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: A comparison of eleven sea ice concentration algorithms // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2014. V. 52. №11. P. 7233–7246.

«Наш Север»: рождение.

Малинина Ирина Владимировна,
заведующий отделом по работе с посетителями,
музей Ледокол «Красин»

В седьмом выпуске журнала мы начинаем новую рубрику об образовании, учебных программах и интересных событиях, связанных с арктическими исследованиями. Эта рубрика для студентов, школьников, дошкольников, и, конечно же, их родителей. Нашими первопроходцами стали сотрудники музея Ледокола «Красин», которые рассказали об удивительных программах обучения детей от пяти лет и старше. Первая программа «Наш Север» стартовала в 2010 году, вторая программа «Легко ли быть «Лидером»?» только недавно появилась на свет и уже имеет большой успех. Занятия проходят прямо на борту ледокола, который пришвартован около набережной Лейтенанта Шмидта в Санкт-Петербурге, а с борта открывается вид на Балтийский завод и видны поочередно строящиеся там атомные ледоколы «Арктика», «Сибирь» и «Урал». Таким образом, маленькие «полярники» окунаются в самую гущу событий – сплошное наглядное пособие! Вы думаете, только малышам интересно? Стоит посмотреть на глаза родителей, которые, как будто, ненароком, оказываются в первых рядах на лекциях, а дома скупают все возможные игрушки на арктическую тематику.

Приятного чтения и надеемся, что эта рубрика будет для вас полезна и интересна.

Научный редактор журнала,
Т.А. Алексеева

Своим рождением цикл музейных занятий для юных полярников «Наш Север» во многом обязана одной активной и дружной семейной компании. Впрочем, всё по порядку.

Давным-давно, в 2010 году, на свет появилась наша первая музейная разработка для дошколят - игровая экскурсия «На далёком Севере». Согласно легенде, детишки вместе с родителями отправлялись в экспедицию на полярную станцию. Кем только не побывали! И рулевыми, и механиками, и летчиками ледовой разведки, и радистами… И даже станцевали под песню Юлия Кима «На далеком Севере ходит рыба кит», которая, собственно и дала название экскурсии для малышей. Но! Ох, уж эти «но»… какие подводные (или подлёдные? - в нашем случае) камни они скрывают! Всё дело в том, что в финале игры-экскурсии каждый юный участник получал «Зачетную книжку».

Почти 10 лет на борту ледокола «Красин» проходят удивительные программы обучения для детей от пяти лет.

А в этой книжке написано, что, посетив наш музей ровно семь раз - магическое число, не правда ли? - обладатель книжки получит гордое звание «Юного друга Ледокола «Красин». И вот тут создатели программы сказали: «Ой...» Конечно, можно провести еще одну экскурсию, ну две, посещая те места корабля и экспозиции, которые кандидаты в «Юные друзья» еще не видели. А потом? Ведь, как известно, тот, кто сказал «А», должен сказать и «Б, В...» и все остальные буквы алфавита.

Призадумались создатели, почесали в затылках и решили большой и вкусный «пирог» под названием «Ледокол «Красин» поделить на порции, которые по силам малышам от 5 лет. Так появился 1-й, и тогда еще – единственный, курс занятий «Наш Север». Абитуриентов оказалось много - целых 6 групп. И одной из них была та самая дружная семейная команда, имеющая за плечами опыт занятий в разных музеях. Именно они и стали нашей контрольной и референтной группой. И первое, что было сделано с их помощью - скорректировано расписание и наполнение курса. Оказалось, например, что «Родословная ледокола» вполне умещается в одно занятие, а не в два. А вот «Имена на карте Арктики» и «Как пройти к Полюсу?» - вовсе отдельные большие темы. Открытый, взаимно заинтересованный диалог музейных работников и семейной команды оказался весьма продуктивным.

"ВПЕЧАТЛЕНИЯ ДЕТСТВА — САМЫЕ ЯРКИЕ"

Мы очень благодарны нашим «первенцам» за непосредственную, оперативную обратную связь. За то, что они не просто уходили с занятий, унося в себе удовлетворение или недовольство, разочарованность или восторг от новых знаний, а честно, по-дружески высказывали свое мнение, пожелания, замечания. Стоит ли удивляться, что до конца курса только эта команда дошла в полном составе?

А дальше… дальше они потребовали продолжения - второго курса. И мы не смогли отказать. Так, кроме уже пройденных в первый год «Родословной ледокола», «Природы и животного мира Арктики», «Народов Севера», «Имен на карте..» и «Как пройти к Полюсу?» появились «Архитектура и устройство корабля», «Такелаж», «Всё о море» с удивительными «мертвой водой» и «жидким грунтом», занятие про лёд, навигационные приборы и очень сложная тема о Полярных конвоях в «Войне в Арктике».

При кажущейся простоте - это же дети, дошкольники, работа над каждым новым занятием становилась настоящим испытанием. Отбор материала, его компоновка, подача с учетом возраста главных слушателей - это балансирование между «слишком сложно» и «слишком просто». Насколько трудно дошколятам работать с картой? Но у нас это не просто карта, это - «машина времени». Мы путешествуем по ней, повторяя путь первопроходцев. И мальчик Степа очень переживает за участников каждой экспедиции: «А они вернулись домой?» А через некоторое время уже серьезная девочка Лена проводит в детском саду «ликвидацию ледовой безграмотности». Оказывается, воспитательница заявила, что слова «снежура» не бывает. Буквально на следующий день Лена, вооружившись «ледовым словариком» доказывает, что снежура не только бывает, но и очень коварна. Несмотря на то, что занятия адресованы детям, родители увлечены в не меньшей степени: внимательно слушают, задают вопросы, советуются, что еще можно почитать, посмотреть по той или иной теме. И это очень важно - заинтересовать, вовлечь в совместный процесс познания.

Уже почти 10 лет мы с ребятами и их родителями изучаем наш Север, строим бумажные кочи, зажигаем в бархатной полярной ночи северное сияние для белого медведя, ставим чум, «создаем Землю» в ящике с песком - заливы, проливы, бухты, моря и океаны… Провожаем выпускников и набираем новый «призыв» на «Наш Север».

Впечатления детства - самые яркие. И кто знает: может быть когда-то на карте Арктики появятся имена и наших выпускников?

Неожиданная Арктика.

Иоффе Диана Борисовна, экскурсовод, музей Ледокол «Красин»

Один из самых часто задаваемых вопросов на обзорной экскурсии по ледоколу «Красин» формулируется как «зачем нам ледоколы?» Этот вопрос можно услышать от самых разных категорий посетителей. В итоге, он лёг в основу нового занятия, апробированного в рамках 15 фестиваля «Детские дни в Петербурге» в 2019 г.

Мы предложили нашим посетителям, детям 9-11 лет и их родителям, поразмышлять на тему глобального потепления, о котором все слышали, и новых ледоколов, строительство которых периодически освещается в средствах массовой информации.

В ходе занятия подтвердились наши предположения о том, что более всего посетители наслышаны об антропогенной версии причин глобального потепления и пересказывали её как единственно существующую. (Только два раза мы услышали другую версию: один раз папа внятно озвучил, что существует безосновательная версия антропогенных причин глобального потепления, в другой раз школьник заявил, что это глупая «выдумка некоторых учёных».) Объяснить взаимосвязь углекислого газа как следствие действия человека, таяния ледников/льда и повышения уровня мирового океана для большинства оказалось затруднительным. Родителям мы адресовали вопрос о том, как давно они слышат о глобальном потеплении. Этот вопрос стал первым, почти пробным ударом по картине мира взрослых. Совместными усилиями мы на каждом занятии приходили к выводу, что уже лет 30 слышим одну и ту же версию развития сценария глобального потепления.

Мы озвучивали существование другой версии причин глобального потепления, космогенного (цикличного) характера. Мы сознательно не настаивали на верности одной из двух версий, считая, что наши пристрастия так же необъективны, как ажиотаж вокруг Греты Тунберг. Обращаясь к нашей аудитории, мы имели

восхитительную возможность держать нейтралитет и предложить просто подождать ещё лет 30 – 40.

Отложив решение вопроса о причинах глобального потепления, далее в занятии мы обращались к насущным проблемам нашей страны – к Северному морскому пути. Задуманный ещё С.О. Макаровым, осуществлённый в годы советской власти, он, несмотря на сложности самоокупаемости в условиях кризиса, – важнейшая транспортная магистраль и для нашего государства, и для мировой экономики. Собственно, именно сейчас Северный морской путь выходит на международный уровень в качестве альтернативы Южному морскому пути через Суэцкий канал. Для детей не составляет труда определить главное преимущество Северного морского пути – его трасса почти в два раза короче. Размышление о недостатках Северного морского пути вызвало сложности, однако, совместными усилиями мы добрались до того, что на севере свободному проходу судов препятствуют льды, как следствие лучше всего «работает» Северный морской путь 2-3 месяца в году (посетители предполагают, какие именно), требуются ледоколы и на них специально обученные команды.

Большинство жителей нашей страны не сталкиваются с вопросом, что такое лёд и каким он бывает. Поэтому даже беглый обзор характеристик льда вызывал на занятии неподдельный интерес и у детей, и у их родителей. Более подробно мы рассматривали зависимость толщины льда и груза, который он может выдержать. Взяв шаг в 5 сантиметров, мы дошли до полуметрового льда, сравнивая весовые характеристики с объектами, понятными школьной аудитории. Мы сравнили 50 см с ростом присутствующих на занятиях детей, также проинформировали, что лёд даже на нашем Финском заливе бывает более 50 см.

Познакомившись с принципами действия ледокола на примере ледокола «Красин», мы обратились к деятельности учёных, без исследований которых не было бы возможно ни освоение, ни развитие Северного морского пути. В качестве сюжетного хода мы представили, что мы, как раз, и являемся теми учёными, которые исследуют природные условия северных регионов страны, и, что нам поставлена задача дать навигационные рекомендации каравану судов, ожидающих прохода по Северному морскому пути. Это позволило нам осветить, каким большим объёмом данных приходится оперировать исследователям, коснуться вопроса наблюдений, ведущихся на гидрологических, метеорологических и полярных станциях, необходимости как можно более обширной сети станций для более высокой точности данных исследований и основанных на них прогнозах. Мы познакомили наших посетителей с картами ледовой обстановки Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей за период октябрь 2018 – октябрь 2019 гг. Карты взяты нами из архива официального

сайта ААНИИ http://www.aari.ru/. Работая с картами, школьники и их родители самостоятельно определили наиболее благоприятный период для прохождения Северного морского пути, таким образом опровергнув собственные сделанные ранеее предположения. Невероятное удивление вызывает ледовая обстановка в Восточно-Сибирском море летом 2019 года. Это один из наиболее наглядных ответов на вопрос, нужны ли ледоколы в период глобального потепления.

Через сколько морей проходит Северный морской путь? Ледовые карты скольких из них может сделать один специалист? Сколько учится этот специалист? Моря считаем вместе – школьники 3 – 5 классов ещё не изучают географию и в близлежащем к Петербургу Балтийском море ориентируются с трудом. Здравая мысль, что один специалист создаёт карту ледовой обстановки для одного моря, возникала часто, тогда мы только подтверждали её дополнительной информацией о сведениях, которые должен знать и учесть специалист (наличие рек, течений, режим моря). От опешивших родителей часто исходил вопрос, где же учат этих специалистов?

Вопрос «Сколько специалистов могут дать навигационные рекомендации?» вызывал совершенно фантастические ответы: 5 000, поскромнее – 200. С одной стороны, тут может играть роль то, что школьники представили объём необходимой предварительной работы и таким образом учли его. С другой – дети слабо представляют число людей, занятых в одном предприятии (скажем, преподавательский состав и количество учеников в своей школе).

Оценивать результативность занятия всегда сложно – мало критериев, нет возможности сделать ещё один «замер» спустя некоторое время. Мы опираемся на очень субъективные наблюдения. Несколько восторженных отзывов в социальных сетях и на сайте фестиваля «Детские дни в Петербурге», неизменные благодарности в конце занятия и восторженно-ошеломлённое настроение детей и их родителей во время занятия, которое идёт больше часа. Последнее – очень важный признак для нас. Это означает, что с высокой долей вероятности участники занятия внутри семьи ещё раз обсудят заинтересовавшую, удивившую, впечатлившую их информацию.

«Российская Арктика» – научный рецензируемый журнал, который издается с 2018 года в электронном виде. Издание выходит на русском и английском языках.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС77-72859 от 22 мая 2018 года.

Номер ISSN: 2658-4255

Задачи журнала:

- предоставить ученым, занимающимся изучением Арктики, возможность оперативно публиковать результаты своих исследований;
- обеспечить научное сопровождение стратегически важных проектов в Арктике;
- привлечь внимание широкой аудитории к проблемам здравоохранения коренного населения, экологии и климата русского Севера;
- предоставить российским и иностранным ученым площадку для диалога и обмена знаниями;
- повысить престиж научных исследований российских ученых на мировом уровне.

Тематики

К публикации принимаются научные работы по следующим дисциплинам:

- 03.02.00 Общая биология
- 03.03.00 Физиология
- 05.22.00 Транспорт
- 05.14.00 Энергетика
- 25.00.00 Науки о Земле

Периодичность

Журнал выходит 4 раза в год; по запросу публикуются тематические и специальные выпуски.