UDC 551.467.3.03(98)
DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12102

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Е.У. Миронов, С.В. Клячкин, В.М. Смоляницкий, А.В. Юлин, С.В. Фролов

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

mir@aari.ru, icefor@aari.ru

В статье рассмотрено современное состояние и перспективы дальнейших исследований закономерностей формирования ледового режима, разработки методов ледовых прогнозов и развития мониторинга ледяного покрова. Обоснована важность изучения как общих закономерностей ледового режима Северного Ледовитого океана, так и выявление пространственно-временной изменчивости отдельных элементов ледового режима.

Ключевые слова: арктические моря, ледовый режим, ледовый мониторинг, ледовые прогнозы, ледяной покров, моделирование.

CURRENT STATE AND PERSPECTIVES OF ICE COVER STUDIES IN THE RUSSIAN ARCTIC SEAS

Ye.U. Mironov, S.V. Klyachkin, V.M. Smolyanitsky, A.V. Yulin, S.V. Frolov

State Research Center of Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

The article considers current state and perspectives of further studies of peculiarities of formation of the ice regime, development of the methods of ice forecasts and development of ice cover monitoring. The importance of investigation of both the general regularities of the ice regime of the Arctic Ocean and revealing of spatial-temporal variability of some ice regime elements is justified.

Keywords: ice cover, Arctic Seas, ice regime, ice monitoring ice forecasts, modeling.

Статья получена: 03.09.2020
Принята к публикации: 6.09.2020
Опубликована онлайн: 09.09.2020

Введение

Ледяной покров, сохраняющийся в Северном Ледовитом океане круглогодично, является одной из главных особенностей его гидрометеорологического режима. Морские льды, взаимодействуя с атмосферой и океаном, формируют основные компоненты климатической системы Арктики. Основой мониторинга ледяного покрова в настоящее время являются космические средства дистанционного зондирования [1].

Большой грузопоток по Северному морскому пути (СМП) в советский период и быстрое расширение объема морских перевозок, особенно минерального сырья, в современный период обуславливает большую практическую значимость исследований ледяного покрова российских арктических морей и разработку методов ледовых прогнозов. Важным аспектом повышенного интереса к особенностям ледового режима локальных районов стало освоение лицензионных участков шельфа арктических морей, включая проведение геологоразведочных и сейсмических работ на ограниченных акваториях. Решения практических

© Ye.U. Mironov, S.V. Klyachkin, V.M. Smolyanitsky, A.V. Yulin, S.V. Frolov
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

задач, включая разработку методов долгосрочных ледовых прогнозов, невозможны без регулярного мониторинга ледяного покрова и выявления общих закономерностей развития ледяного покрова Северного Ледовитого океана (СЛО). Эта стратегия развития морского ледоведения была сформулирована в основополагающей работе В.Ю. Визе [2]. В связи с вышесказанным основными направлениями исследований ледяного покрова морей российской Арктики являются:

- Мониторинг состояния ледяного покрова на основе регулярных наблюдений на гидрометеорологических станциях и в специальных экспедициях.
- Сбор, каталогизация и ведение электронного архива ледовых карт, тематических продуктов на основе данных ИСЗ.
- Экспериментальные исследования физических процессов в ледяном покрове, математическое моделирование эволюции ледяного покрова.
- Исследование закономерностей формирования ледового режима Северного Ледовитого океана и арктических морей.
- Создание и совершенствование методов и технологий диагностики и прогноза ледовых условий на акваториях арктических морей.
- Изучение ледовых условий судоходства в полярных районах, разработка методов и технологий навигационных рекомендаций.

Основные направления можно обобщить в виде концептуальной схемы исследования ледяного покрова в морях Российской Арктики (рис. 1).

В статье будет рассмотрено современное состояние и перспективы дальнейших исследований каждого основного направления исследований ледяного покрова.

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Каталогизация и ведение электронного архива по данным ИСЗ.

В настоящее время наиболее обширный архив цифровых данных по морскому льду Северного Ледовитого океана в стандартных форматах хранения сформирован в рамках проекта Всемирной метеорологической организации (ВМО)

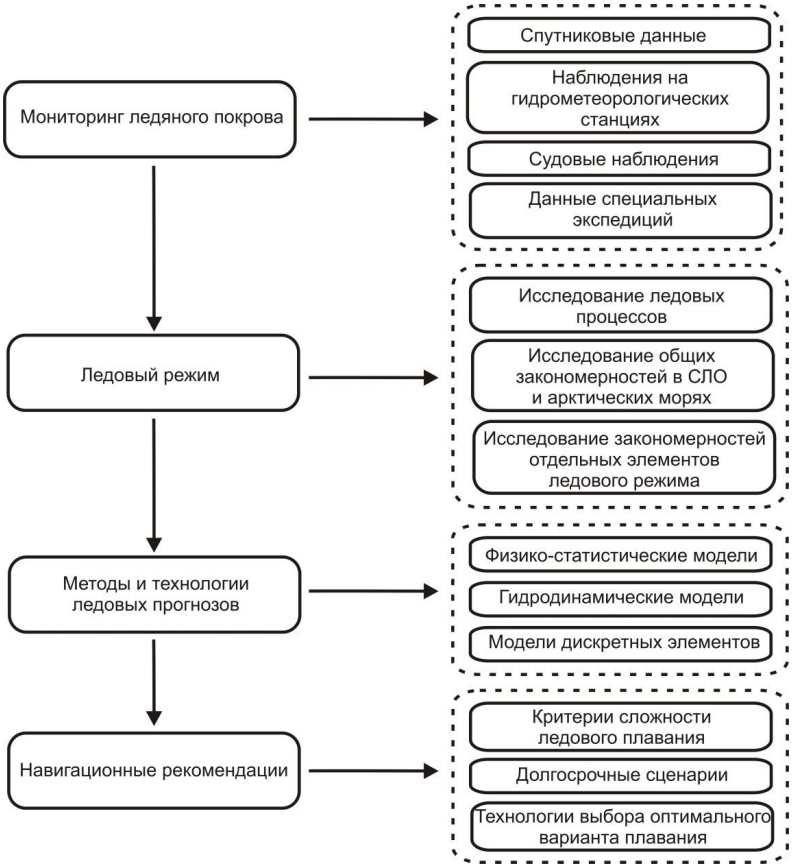

Рисунок 1 – Концептуальная схема основных направлений исследования ледяного покрова.

«Глобальный банк цифровых данных по морскому льду» (ГБЦДМЛ), поддержку которого в ААНИИ осуществляет Мировой центр данных (МЦД) по морскому льду. Основу архива данных составляют регулярные ледовые карты отдельных акваторий СЛО от национальных ледовых служб мира – России (СССР), Дании, Канады, США, покрывающие период инструментальных наблюдений с 1933 г. по настоящий момент времени с дискретностью от 7 суток до 1 месяца. Общее количество ледовых карт на май 2019 г. составило более 33 тыс. единиц хранения.

В основу формирования архива данных ГБЦДМЛ заложена концепция представления ледовых карт от различных национальных ледовых служб мира, имеющих различные периоды обобщения и покрывающие различные акватории, в единых форматах ВМО. Используется растровый формат СИГРИД [3] и СИГРИД-2, предусматривающие кодирование ледовых параметров в узлах географической сетки 15 на 15 географических минут. Кроме того, используется векторный формат СИГРИД-3 [4], предусматривающий векторное кодирование границ однородных ледовых зон с точностью 1 географическая минута или выше. Кодирование состава ледовой информации в точке растра (СИГРИД или СИГРИД-2) или зоне (СИГРИД-3) выполняется строго в соответствии с терминологией и кодовыми таблицами Номенклатуры ВМО по морскому льду [5]. Необходимая для пользователей информация об особенностях ледового картирования национальных ледовых служб мира, включая Россию, регулярно суммируется в специальной публикации ВМО [5].

Раздельная или совместная обработка массивов ледовых карт ледовых служб мира позволяет наиболее точно на сегодняшний день оценить распределение общей сплоченности и возрастного состава ледяного покрова, положения ледяных массивов, границы припайных льдов и их межгодовые изменения (рис. 2).

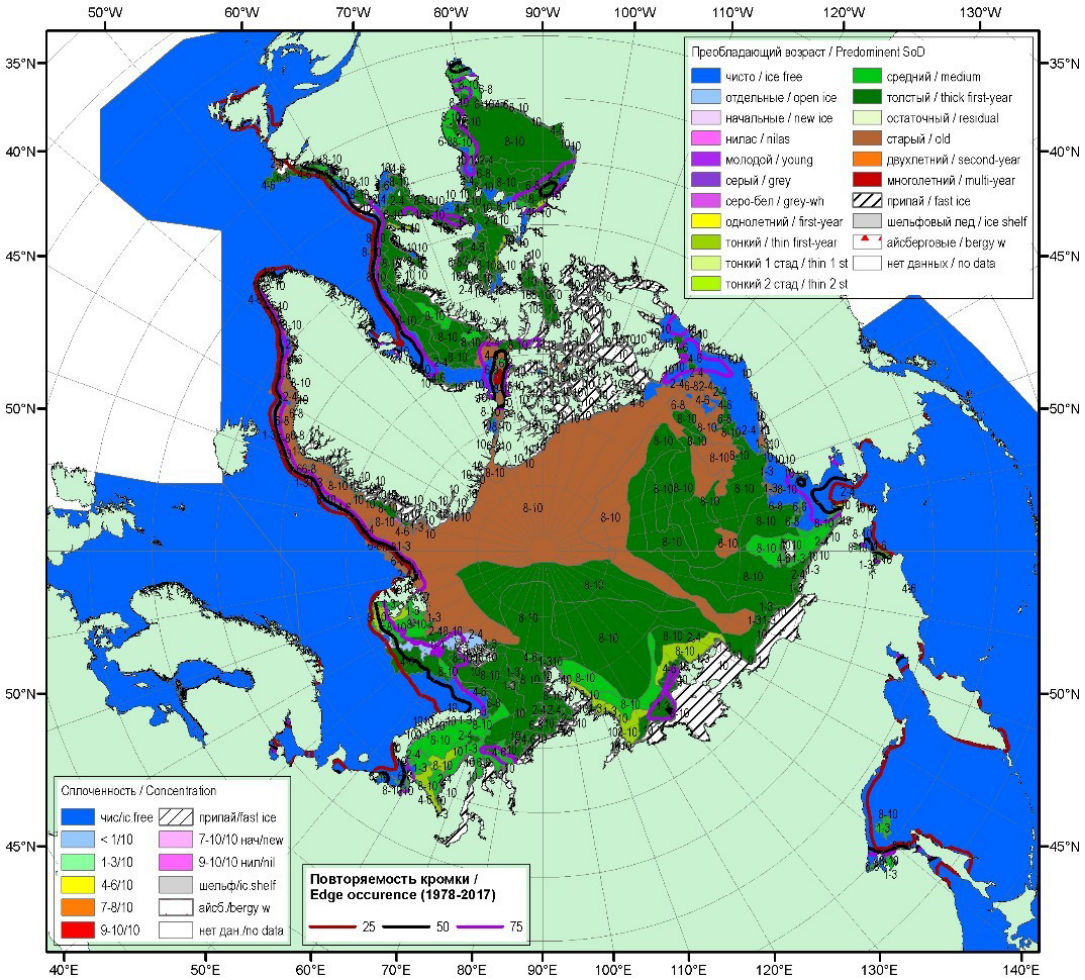

Рисунок 2 – Обзорная ледовая карта СЛО по возрасту за 13-18 июня 2019 г., составленная на основе ледового анализа ААНИИ, КЛС и НЛЦ США.

© Ye.U. Mironov, S.V. Klyachkin, V.M. Smolyanitsky, A.V. Yulin, S.V. Frolov
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Вторым наиболее весомым массивом данных ГБЦДМЛ являются 1-2 дневные данные 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) и охватывающие период с 26.10.1978 г. по настоящий момент времени [6]. Данная информация представляет собой матрицы оценки общей сплоченности морского льда в процентах по ячейкам сетки полярной стереографической проекции размерностью 25 на 25 км. Эти данные имеют известные ограничения и погрешности – занижение сплоченности для разрушенного льда в период таяния, полос и пятен, ложные эффекты в береговой зоне и зонах движения полярных циклонов. Однако данный массив при должном экспертном контроле предоставляет уникальные возможности для оценки вероятностных характеристик сплоченности льда, а также положения кромки льда и ледовитости.

Характеристики указанных архивных ледовых данных МЦД МЛ ААНИИ по СЛО представлены в таблице 1. В соответствии с принятой политикой обмена данными ВМО доступ пользователям предоставляется без ограничений через каталоги обменного сервера МЦД МЛ (http://wdc.aari.ru). Следует отметить, что полный архив данных МЦД МЛ не ограничивается вышеописанными массивами информации и включает данные по другим эле-

Таблица 1

Состав архивных ледовых данных МЦД МЛ ААНИИ.

№	Название массива	Период, гг./ периодичность	Наличие пропусков	Формат	Оцениваемый параметр
1а	Исправленные и уточненные 10-дневные ледовые карты ААНИИ по акватории Северного Ледовитого Океана	1933-1992 / 10-30 дней	Да	СИГРИД	Общая сплоченность, возраст, припай
1б	7-дневные комплексные карты состояния ледяного покрова в арктических и замерзающих морях России	1997 - по настоящее время / 7 дней	Нет	СИГРИД-3	Общая сплоченность, возраст, форма
2	7-дневные комплексные карты состояния ледяного покрова Северной полярной области НЛЦ США	1972 - по настоящее время / 7 дней	Нет	СИГРИД, СИГРИД-3	Общая сплоченность, возраст, форма
3	7-дневные комплексные карты состояния ледяного покрова Канадской Арктики КЛС	1968 - по настоящее время / 7 дней	Да	СИГРИД, СИГРИД-3	Общая сплоченность, возраст, форма
4	7-дневные комплексные карты состояния ледяного покрова вод Гренландии Датского метеорологического института	1999-2014 / 7 дней	Нет	СИГРИД-3	Общая сплоченность, возраст, форма
5	1-2 дневные данные пассивного микроволнового зондирования SSMR-SSM/I-SSMIS по алгоритму NASATEAM	1979 - по настоящее время / 1-2 дня	Нет	матрица	Общая сплоченность, ледовитость

ментам и параметрам природной среды полярных областей Земли в целом, в том числе данные по Южному океану, айсбергам, дрейфующим станциям «Северный полюс», дрейфующим буям и т.д.

Наблюдения на гидрометеорологических станциях и ледоисследовательские экспедиционные работы.

На береговых и островных полярных гидрометеорологических станциях измеряют толщину льда, торосистость, разрушенность льда и даты наступления осенних и весенних ледовых фаз. Преимуществом этих наблюдений является их регулярность и продолжительность. К сожалению, в 1990-е годы большая часть полярных станций была закрыта и в настоящее время этих наблюдений не хватает, особенно в восточных арктических морях.

Необходимым условием освоения континентального шельфа арктических морей является проведение ледовых исследований, которые позволяют получить инструментальные данные по морфометрическим характеристикам ледяных образований, физико-механическим свойствам льда и параметрам динамики ледяных полей. Эти характеристики невозможно получить на основе спутниковых дистанционных методов, поэтому используется вертолет или ледокол / судно ледового класса для высаживания полевой группы на лёд, которая выполняет инструментальные измерения.

Наиболее эффективным методом определения вертикальных параметров и внутренней структуры ледяных образований является установка водяного термобурения льда с компьютерной записью скорости бурения, разработанная в ААНИИ. Скорость бурения зависит от подаваемой тепловой мощности, пористости и температуры льда. Для определения рельефа верхней и нижней поверхности ледяных образований используется электронный тахеометр, подводные телеуправляемые аппараты и гидролокаторы кругового обзора [7]. Важным методом получения информации о геометрических размерах айсбергов и стамух является аэрофотосъемка, выполняемая с вертолета или беспилотного летательного аппарата (малого или среднего радиуса действия). Используемые методы позволяют с большой точностью строить трёхмерные модели ледяных образований. Результатом проведения таких исследований являются особенности пространственно-временной изменчивости морфометрических параметров гряд торосов, стамух и айсбергов.

Для определения характеристик дрейфа ледяных полей и айсбергов применяются автономные буи (радиомаяки) различных спутниковых систем (ARGOS, IRIDIUM) и различных модификаций. Получаемые с помощью этих приборов сведения позволяют определять параметры дрейфа ледяных полей и айсбергов на обширных акваториях в течение 3-4 месяцев с дискретностью 1 час [7].

Судовые наблюдения.

Современные методы дистанционного зондирования Земли из космоса не позволяют получать надежные значения важных параметров ледяного покрова, характеризующих его состояние (торосистость, сжатия, разрушенность и др.). В связи с этим, ледовые наблюдения, осуществляемые с борта судна, занимают важное место в изучении ледяного покрова. Современные судовые ледовые наблюдения осуществляются по двум направлениям – визуальные и инструментальные.

Визуальные специальные судовые ледовые наблюдения направлены на получение обширной и детальной информации на основе методических принципов, разработанных в ААНИИ. Специальные ледовые наблюдения выполняются с ходового мостика судна круглосуточно по всему маршруту следования судна во льдах вахтовым способом (6 вахт по 4 часа). Основным принципом выполнения специальных судовых ледовых наблюдений является выделение однородной ледовой зоны, характеристик ледяного покрова в ней, а также эксплуатационных показателей движения судна в пределах этой однородной зоны. Оценка стандартного комплекса характеристик ледяного покрова в однородных ледовых зонах осуществляется отдельно: по райо-

© Ye.U. Mironov, S.V. Klyachkin, V.M. Smolyanitsky, A.V. Yulin, S.V. Frolov
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

ну плавания, в зоне, ограниченной пределами горизонтальной видимости и непосредственно на пути плавания, в зоне по курсу судна, ширина которой равна 6-кратной ширине, а длина — 3-кратной длине корпуса судна. В 2004 г. разработано программное обеспечение для электронного журнала судовых специальных ледовых наблюдений.

Инструментальные судовые ледовые наблюдения основаны, прежде всего, на разработанном в 2003 г. в ААНИИ судовом телевизионном комплексе (СТК), предназначенном для наблюдения за характеристиками ледяного покрова на пути плавания судов. СТК – стандартная система видеоконтроля, адаптированная для специфических условий судовых специальных ледовых наблюдений. СТК регистрирует толщину льда, высоту снега, состояние ледяного покрова у борта судна, скорость сложения канала за кормой судна, характеризующая интенсивность сжатий в ледяном покрове, эксплуатационные характеристики движения судна во льдах [8]. На СТК получен патент на авторскую модель и ряд авторских свидетельств на программное обеспечение. В настоящее время разрабатываются алгоритмы использования данных беспилотных летательных аппаратов и судового ледового радара для выполнения судовых ледовых наблюдений.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ

Изучение закономерностей формирования ледового режима арктических морей

Одной из основополагающих работ в изучении закономерностей формирования ледового режима арктических морей является монография, подготовленная коллективом автором [9]. Монография стала методологической основой для развития методов долгосрочных ледовых прогнозов.

В современный период анализ многолетней изменчивости площади ледяного покрова в арктических морях льда за период с начала XX века до начала XXI века сделано в монографии [10]. В работе рассмотрены основные механизмы влияния морских арктических льдов на климатическую систему. Установлено, что многолетние изменения площади льда формировались линейными трендами и долгопериодными циклами продолжительностью 10, 20 и 50-60 лет. Показана сопряженность долгопериодных изменений ледовитости с климатическими колебаниями индексов атмосферной циркуляции, температуры воздуха и др. параметрами. На основе выявленных устойчивых циклических колебаний дана оценка возможных тенденций изменения площади морского льда.

Дальнейшие исследования ледового режима продолжались в двух направлениях – выявление общих закономерностей формирования ледового режима в СЛО или отдельных морях, а также изучение пространственно-временной изменчивости отдельных элементов ледового режима.

К первому направлению относится работа группы авторов в рамках коллективной монографии [11], в которой выполнено обобщение ледовых условий для всего Северного Ледовитого океана и отдельно для арктических морей. Рассмотрены сезонные изменения состояния ледяного покрова, крупномасштабная изменчивость дрейфа льдов, закономерности распределения ледяного покрова. Для арктических морей выявлены закономерности ледообразования и нарастания льда, ледообмена арктических морей с Арктическим бассейном, формирования припая и полыней, распределения льда в период разрушения ледяного покрова. Важный вывод сделан о пространственной и межгодовой изменчивости толщины ровного льда. В течение всего холодного периода толщина льда в центральных районах арктических морей больше, чем в южных районах Карского и Чукотского морей, подверженных влиянию атлантического и тихоокеанского региона, смягчающих суровость арктической зимы. В зависимости от суровости зимних условий скорость нарастания толщины льда испытывает межгодовые колебания. Как следует из расчетов, мно-

голетние изменения толщины льда происходят в среднем в интервале плюс-минус 30-50 см.

В монографии [12] выполнено исследование региональных особенностей и закономерностей пространственного распределения, сезонной и многолетней изменчивости основных элементов ледового режима Гренландского и Баренцева морей. Выполнено районирование морей по ледовым признакам. Выявлены основные природные факторы, определяющие формирование типа ледовых условий. Сделана оценка толщины льда с учетом гряд торосов, расчеты эффективной толщины и оценка объема льдов в исследуемых морях и в целом СЛО. В работе показана значимость региона в климатической изменчивости площади льда Северного Ледовитого океана.

В коллективной монографии [13] выполнено комплексное исследование изменчивости метеорологических, ледовых и океанологических условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей. При исследовании использовались два методологических подхода:

- изучение пространственного распределения, сезонной и межгодовой изменчивости ледовых условий на основе комплексного физико-географического изучения природных объектов с применением методов статистического анализа;
- расчеты различных типовых и экстремальных сценариев на основе гидродинамических моделей вод и льдов.

В монографии рассмотрен годовой цикл естественных изменений ледовых условий, процессы замерзания акваторий, становления припая, нарастания толщины льды, пространственная неравномерность толщины и торосистости ледяного покрова, пространственно-временная изменчивость положения кромки льдов и сплоченности льда, межгодовая изменчивость сроков очищения акватории ото льдов и продолжительность безледного периода. Кроме того, даны определения и приведена характеристика изменчивости опасных и неблагоприятных ледовых явлений.

Характеристика основных элементов ледового режима морей азиатской части России, приведена в научно-справочном пособии [14] на основе данных за последние 30 лет, кроме того отдельно рассмотрены изменения, произошедшие за 15-летний период XXI века. Для каждого моря проанализированы особенности появления льда на акватории, приведены таблицы дат наступления ледовых фаз по данным ГМС, рассмотрены процессы нарастания и распространения льда, а также очищения акватории ото льдов. Получены количественные оценки изменений сроков ледовых фаз в конце XX века – начале XXI века.

Исследования пространственно-временной изменчивости отдельных элементов ледового режима выполнены в монографиях [15, 16] и режимно-справочных пособиях [17, 18].

В монографии [15] изложены результаты исследований условий формирования и разрушения припая и заприпайных полыней в морях Сибирского шельфа. Обработка данных за 1980–2010 гг., полученных с ИСЗ, позволила существенно уточнить и выделить закономерности развития припая и заприпайных полыней. Выполнен анализ сезонной изменчивости толщины и ширины припая в арктических морях. Рассмотрена межгодовая и многолетняя изменчивость площади припая и заприпайных полыней. В отдельной главе рассмотрено влияние распространение припая и заприпайных полыней на условия плавания по Северному морскому пути.

В коллективной монографии [16] обобщены результаты исследований по описанию условий формирования и пространственно-временной изменчивости комплекса опасных ледовых явлений и ледяных образований в арктических морях. Выполнена классификация опасных ледовых явлений и неблагоприятных ледовых условий и рассмотрено их влияние на безопасность судоходства. Детально рассмотрены сжатия льдов, интенсивный дрейф льдов или ледовая река, облипание корпуса судна снежно-ледяной подушкой, сужение канала в припае, аномально раннее ледообразование, вторжение сплоченных льдов

© Ye.U. Mironov, S.V. Klyachkin, V.M. Smolyanitsky, A.V. Yulin, S.V. Frolov
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

на судоходные трассы, обледенение судов, а также пространственно-временная изменчивость распространения стамух и айсбергов. Таким образом, в монографии впервые выполнено обобщение существующих знаний о комплексе ледовых явлений и ледяных образований, представляющих опасность для судоходства в Арктике.

В режимно-справочном пособие [17] на основе данных Международной программы арктических буёв (МПАБ) за 30-ти летний период подготовлены расчетные поля дрейфа льда в Арктическом бассейне при типовых барических ситуациях. Наличие связи между полем скорости дрейфа льда и полем приземного атмосферного давления позволяет корректно получать изолинии скоростей, даже в тех районах, где буи значительно удалены друг от друга. Расчет скорости дрейфа в узлах сетки 200x200 км проводился с применением метода объективной интерполяции.

В режимно-справочном пособие [18] на основе данных с ИСЗ в ТВ и ИК диапазонах за период 1982–2013 гг. выполнено обобщение крупных нарушений сплошности льда (НСЛ) или разрывов в Карском море и в северо-восточной части Баренцева моря. Показателями НСЛ принято считать следующие характеристики: удельная длина, модальное направление, протяженность разрывов в модальном интервале, обеспеченность этого интервала, среднее расстояние между разрывами. В пособие приведен комплект карт среднемноголетних характеристик разрывов, выполненный в узлах сетки 100x100 км с октября по май. Кроме средних значений характеристик определялись также диапазоны их межгодовых изменений.

Атласы, методические пособия

Сформированные в ААНИИ под эгидой МЦД МЛ массивы и каталоги данных ледового картирования позволяют выполнять обобщения ледовых параметров и создавать широкий круг Атласов и методических пособий различной полноты и географического охвата. Для региональных исследований это может быть одно из морей Российской Арктики и единственный параметр – ледовитость, для полномасштабных, общегеографических исследований – вся акватория СЛО и набор характеристик – общая сплоченность и её интервалы, кромка льда, возрастной состав, опасные явления и т.д., сформированные в форме Атласа. Примерами таких обобщений за последние годы являются серия атласов, как всего СЛО, так и морей Российской Арктики [19 – 21].

Общая концепция подготовки материала Атласов и методических пособий основана на максимально возможном использовании данных и сохранении на всех этапах обработки точности представления информации. Методически концепция включает формирование набора географически привязанных полей параметров морского льда, их обобщение в форме гистограмм с последующим расчетом полей статистических характеристик и подготовку иллюстративного материала в среде Геоинформационных систем (ГИС) типа ArcGIS и QuantumGIS.

Технологические аспекты реализации данной концепции учитывают форматы хранения исходных данных (СИГРИД, СИГРИД-2, СИГРИД-3), географическую область, наличие пропусков в данных по времени и пространству, кодировку параметра. Например, наиболее значимым источником данных о параметрах морского льда СЛО являются 7-10 дневные карты ААНИИ с 1933 года. В отличие от карт НЛЦ США, КЛС и ДМИ, в силу специфики источников информации, и первичной цели ледового картирования – обеспечение навигации по трассам СМП, карты ААНИИ в период по 1992 г. имеют существенные пропуски по времени и пространству. Соответственно, при общем периоде материала 1933 – 1992 гг. и 1997-2017 гг. при максимальном значении числа наблюдений для 3-х декад отдельного месяца порядка ~243, фактическое количество наблюдений (освещенность данными) в конкретной точке будет различно для разных месячных промежутков, акваторий и характеристик.

Решение задачи устранения пропусков данных включает совмещение данных ААНИИ с данными без пропусков,

например, НЛЦ США, с приданием, данным ААНИИ большего веса, преимущественное использование робастных статистик (например, квантилей распределения, а не среднего). Решение задачи обобщения качественных параметров включает придание им количественных характеристик. Например, формирование массива возрастных характеристик выполняется в форме выделения частных сплочённостей начальных и молодых льдов (толщина 0 – 30 см), однолетних льдов (толщина 30-120 см.), старых льдов (толщина > 120 см). Обобщение возрастного состава в многолетнем плане может быть сделано в виде средневзвешенной толщины ровного льда, причем для каждой возрастной градации используется середина интервала толщин льда по Номенклатуре ВМО [5]. При этом, выходные значения средневзвешенной толщины льда фактически будут соответствовать преобладающим возрастным характеристикам.

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЛЕДОВЫХ ПРОГНОЗОВ

Методы долгосрочных ледовых прогнозов.

Современное развитие физико-статистических методов долгосрочных ледовых прогнозов осуществляется по следующим основным направлениям:

- создание методов выбора информативных предсказателей и построения статистических или вероятностных прогностических схем с учетом быстрого развития компьютерных технологий;
- использование типизации ледовых условий, созданной на базе анализа многолетних рядов и диагноза типа развития ледовых процессов на основе сочетания различных определяющих факторов, а также оценки вероятности типа процессов.

В работе [22] показано, что различные комбинации гидрометеорологических факторов приводят к образованию характерных ледовых условий отдельно для каждого естественного однородного района. Формируется ограниченное количество типов ледовых условий, которые устойчиво сохраняются в течение всего летнего периода. Разработан метод локально-генетической типизации, который обеспечивает выделение внутри однородного района устойчивых типов ледовых условий по определенным сочетаниям аномалий природных предикторов. На основе этой методологии был разработан метод прогноза распределения сплоченности льда во всех арктических морях в летний период с декадной дискретностью с заблаговременностью от 1 до 2 месяцев. Созданная база данных распределения льда позволяет в оперативном режиме формировать прогностические поля сплоченности льда.

За последние годы была проведена большая работа по изучению условий формирования и разрушения припая в морях Российской Арктики, результатом этой работы стала монография [15]. Выявленные закономерности позволили обновить методы прогнозов сроков разрушения и взлома припая во всех арктических морях с заблаговременностью до 30 суток [23]. Основной особенностью разработанных методов явилось разделение припайной области на ряд однородных районов с учетом особенностей взлома припая, который протекает поэтапно и начинается на его краях, постепенно переходя на основную часть припая. Методы прогноза были внедрены в оперативную практику и успешно эксплуатируются.

Основным методом, используемым для прогноза ледовитости и площади ледяных массивов, является автоматизированная прогностическая система (АПС) «Пегас» [24]. АПС «Пегас» является самообучающейся системой, учитывающей при построении прогностических схем – поля атмосферного давления, температуры воздуха, ледовитости морей и площади ледяных массивов. Это позволяет АПС «Пегас» учитывать меняющиеся количественные связей между выбранными предикторами и предиктантами. Использование АПС «Пегас» позволило сохранить достаточно высокий уровень оправдываемости прогнозов ледовитости и площади ледяных массивов российских арктических морей в летний период.

© Ye.U. Mironov, S.V. Klyachkin, V.M. Smolyanitsky, A.V. Yulin, S.V. Frolov
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

В 2014 - 2016 гг. был разработан принципиально новый вид ледовых прогнозов – методики прогноза типа ледовых условий в летний период в отдельных районах арктических морей, необходимые Администрации Северного морского пути для выдачи разрешений для плавания судов в акватории СМП. Метод долгосрочного прогноза типов ледовых условий для зимнего периода с месячной заблаговременностью был разработан только для Карского моря, ранее такие методы не разрабатывались. В процессе разработки метода были определены критерии типизации, выделены три основных типа сложности ледовых условий, выполнен поиск закономерностей их формирования [25].

Используемые в настоящий момент в оперативной работе ААНИИ методы прогнозов обладают хорошей информативностью, заблаговременностью и надежностью. Результаты этих прогнозов позволяют проводить стратегическое и тактическое планирование морских операций и их непосредственное проведение. Оправдываемость долгосрочных ледовых прогнозов в среднем составляет 80-85% и не уступает успешности прогнозирования зарубежных ледовых служб.

Математическое моделирование и технологии краткосрочного прогноза.

Краткосрочные (до 3 суток) и среднесрочные (от 3 до 7 суток) ледовые прогнозы являются важной частью специализированного гидрометеорологического обеспечения и широко востребованы организациями, осуществляющими или регулирующими морскую деятельность в Арктике. При всем разнообразии математических моделей, имитирующих ожидаемую эволюцию ледяного покрова, можно условно выделить два принципиальных подхода: динамико-термодинамический и физико-статистический.

Динамико-термодинамический подход представляет собой численное решение системы уравнений совместной динамики и термодинамики океана и ледяного покрова с соответствующими граничными условиями. Если расчетная область представляет собой достаточной обширный регион, т.е. имеет пространственный масштаб сотни или тысячи километров, то она аппроксимируется регулярной сеткой с использованием определенной картографической проекции. При этом распределение характеристик ледяного покрова в пределах ячейки сетки считается однородным. Это условие накладывает важное ограничение на пространственную детализацию аппроксимирующей сетки: размер ячейки сетки должен быть существенно больше характерного размера льдин. Если расчетная область имеет локальный характер (первые десятки километров), то в этом случае сеточная аппроксимация теряет смысл, и прогностическая модель основывается на принципе расчета характеристик каждой отдельной льдины (метод дискретных элементов).

Физико-статистический подход основан на поиске стохастических связей между характеристиками ледяного покрова и внешними факторами, и на установлении соответствующих регрессионных соотношений. Ключевым требованием для построения работоспособной физико-статистической модели прогноза эволюции ледяного покрова является наличие обширных массивов натурных наблюдений, выполненных при различных условиях: разные сезоны годового цикла, разные анемобарические, гидрологические и ледовые ситуации и т.д. Обычно физико-статистические модели используются для прогнозов в локальном пространственном масштабе, как своего рода альтернатива или дополнение к динамическим моделям, основанным на методе дискретных элементов.

В настоящее время как в ААНИИ, так в мировой практике наиболее разработанным и широко применяемым методом кратко- и среднесрочных ледовых прогнозов является динамико-термодинамическое моделирование глобального или регионального масштаба. Физико-математические и вычислительные основы моделирования эволюции ледяного покрова были сформулированы в ряде ставших уже классическими работ 1970-1990-х годов [26 – 33]. К настоящему времени они реализованы в виде компьютерных программ, хотя некоторые частные вопросы в разных моделях решаются по-разному.

Также достаточно отработаны основные аспекты информационного обеспечения моделирования: получение и дешифрирование спутниковых снимков, усвоение и комплексирование разнородной дополнительной информации (наблюдения на судах, на береговых станциях и т.п.), усвоение данных метеорологического форсинга из глобальных или региональных моделей атмосферы. В зависимости от возможностей и запросов потребителя прогностическая информация может передаваться в разных видах и формах. Это – карты-схемы, отражающие географическое распределение интересующего параметра ледяного покрова в фиксированный момент времени, графики или таблицы временного хода в выбранной точке в течение срока прогноза, траектории дрейфа интересующего объекта в течение срока прогноза, простая растровая графика, векторные файлы в форматах, совместимых с современными ГИС или Электронной картографической навигационно-информационной системой (ЭКНИС) и т.д. Необходимо отметить, что все перечисленные функции численного прогнозирования ледовых условий реализованы, в той или иной степени, в прогностических центрах многих стран [34 – 36], в том числе, и в ААНИИ [37 –39].

Достоверность ледовых прогнозов, составленных с помощью динамико-термодинамических моделей, достаточно высокая. Так, в частности, оправдываемость и эффективность 3-5 суточных ледовых прогнозов ААНИИ составляет 90-95% и 1,5-3% соответственно [38]. Примерно аналогичные результаты по достоверности краткосрочных ледовых прогнозов представлены в работе [35], описывающей деятельность канадской ледовой службы.

Таким образом, кратко- и среднесрочные численные ледовые прогнозы глобального или регионального масштаба – это действенный, проверенный и достаточно надежный инструмент получения сведений об ожидаемых ледовых условиях в Северном Ледовитом океане, в отдельном море или в крупной части моря. Востребованность такой информации настолько высока, что возникла необходимость максимально автоматизировать всю технологическую цепочку составления численных ледовых прогнозов, начиная от анализа спутникового снимка – основного источника ледовой информации – до передачи результатов прогноза на рабочее место потребителя. Такие работы проводились, в том числе, и в ААНИИ, с 1970-1980-х годов, но, в связи с быстрым развитием вычислительной техники и программных средств, задача совершенствования программно-аппаратного обеспечения численных ледовых прогнозов является постоянно актуальной. В частности, в 2014-2016 гг. в ААНИИ был разработан экспериментальный аппаратно-программный комплекс (ЭАПК) мониторинга и прогноза ледовых условий в Западной арктической зоне России [40]. Комплекс включает принципиально новую методику автоматизированного дешифрирования морского льда по спутниковым радиолокационным изображениям и снимкам видимого спектрального диапазона. Методика основана на статистических методах анализа двумерных полей, включая нейро-сетевые алгоритмы, что позволяет в автоматизированном режиме составлять электронные ледовые карты в согласованном формате с минимизацией фактора субъективного взгляда ледового эксперта.

Для подготовки с помощью ЭАПК краткосрочного прогноза ледовой обстановки разработана оригинальная численная прогностическая модель «лед–океан», позволяющая совместить представление океана в терминах σ-координат и представление ледяного покрова как набора маркеров. Важно отметить, что в рамках данного ЭАПК новая методика автоматизированного дешифрирования спутниковых снимков и прогностическая модель эволюции ледяного покрова технологически связаны и работают в единой управляющей оболочке, что дает возможность радикально повысить уровень автоматизации и надежность всего процесса составления ледового прогноза.

Однако, как и для любого другого метода анализа или воспроизведения природного явления, для численного моделирования характерны свои ограничения.

© Ye.U. Mironov, S.V. Klyachkin, V.M. Smolyanitsky, A.V. Yulin, S.V. Frolov
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

В настоящее время нет качественного, физически обоснованного метода расчета (прогноза) такого важного параметра ледяного покрова, как размеры льдин (раздробленность). Физический механизм разлома «большой» льдины на несколько «малых» и, наоборот, смерзания льдин до конца неясен. Отчасти то же относится к не менее значимому явлению, каковым является формирование и взлом припая, хотя попытки решить такую задачу известны [41]. Кроме того, принцип сеточной аппроксимации позволяет получать искомые значения параметров ледяного покрова только как средние по площади ячейки сетки, т.е. вся изменчивость внутри ячейки пропадает, хотя площадь ячейки составляет десятки-сотни квадратных километров. Наконец, как отмечалось выше, пространственное разрешение численных моделей, основанных на сеточной аппроксимации, ограничено характерными размерами льдин. Если требуется получить картину с более высокой пространственной детализацией, то необходимо переходить к прогнозированию эволюции каждой отдельной льдины (метод дискретных элементов), присутствующей на расчетной акватории, но такой подход принципиально отличается от сеточной аппроксимации и также имеет свои плюсы и минусы.

Положительной стороной этого подхода является высокая пространственная детализация получаемой прогностической картины. Это требует колоссального объема вычислений и сложной подготовки исходных данных, что ограничивает пространственно-временной масштаб моделей, основанных на методе дискретных элементов, первыми десятками километров и первыми сутками. Однако ограничение масштаба нельзя считать недостатком метода, т.к. высокая детализация необходима именно при решении локальных задач практики: погрузочно-разгрузочные работы у морских ледостойких платформ и терминалов, прохождение судов через локальные, но критически важные участки трассы и т.п. Нерешенными проблемами метода дискретных элементов являются сложность параметризации взаимодействия между льдинами, особенно при 10-балльной сплоченности, отсутствие адекватного метода расчета разлома и смерзания льдин [42]. Наибольшая проблема этого подхода заключается в отсутствии достаточного опыта его применения в оперативном режиме, как в России, так и за рубежом. По существу, все численные эксперименты с моделями дискретных элементов носят тестовый характер [42]. Это обусловливает необходимость, с одной стороны, проявлять некоторую осторожность при оценках перспективности этого метода, а с другой – радикально активизировать работы по его тестированию и доведению до уровня оперативной технологии.

Ледовые условия плавания и технологии навигационных рекомендаций

В связи с активным строительством современных судов ледового класса и ледоколов, в настоящее время выполняются работы по совершенствованию эмпирико-статистической модели движения судна в ледовых условиях, разработанной в ААНИИ в 1980-х гг. [43]. Специалисты института принимают участие в ледовых испытаниях практически всех новых транспортных судов и ледоколов, на основе полученных натурных данных, выполняется настройка модели.

Эти разработки обобщены при создании автоматического рабочего места (АРМ) «Навигационные рекомендации», которое активно применяется при составлении рекомендаций оптимального варианта плавания судна во льдах. В качестве среды разработки, способной обеспечить полноценное функционирование системы, выбрана ГИС. Основным источником ледовой информации являются данные дистанционного зондирования с ИСЗ. Основным критерием оптимальности маршрута являются минимальные затраты времени на плавание судна или каравана судов. Расчет скорости (затрат времени) плавания осуществляется с учетом прогнозируемого перераспределения ледяного покрова в период проведения морской операции [44]. За последние годы выполнены следующие разработки [45 – 47]:

- разработан алгоритм расчета наиболее вероятных и пределов возможных изменений затрат времени и средних скоростей движения, при заданных ледовых условиях плавания для обеспечения проводки крупнотоннажных танкеров;
- разработана модель количественной оценки риска повреждения танкеров в результате сжатий льда при их плавании в морях западного сектора Арктики;
- создан алгоритм определения ледово-эксплуатационных показателей движения судна в зависимости от типа прогнозируемых гидрометеорологических условий;
- разработана методика специализированного прогноза ледово-эксплуатационных характеристик безледокольного плавания современных типов судов.

В настоящее время осуществляется разработка технологии расчета сжатий и торосистости на пути плавания судов, на основе новых алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования ледяного покрова и базы данных ледово-эксплуатационных характеристик движения судов. Продолжатся работы по модернизации модели движения судов во льдах и технологии представления информации на «ледовом терминале» в формате совмещенной с электронной навигационной картой.

Заключение

Анализ структуры архива цифровых данных по морскому льду Северного Ледовитого океана, сформированный в рамках проекта ГБЦДМЛ ВМО, показал обоснованность и необходимость комплексирования данных ледовых служб разных стран для получения наиболее полного и детального распределения ледяного покрова в СЛО. Показано, что для получения подробного состояния ледяного покрова необходимо помимо спутникового мониторинга проводить регулярные судовые наблюдения и специальные экспедиции. Обоснована важность изучения, как общих закономерностей ледового режима Северного Ледовитого океана, так и выявление пространственно-временной изменчивости отдельных элементов ледового режима в арктических морях. Обобщение выявленных закономерностей ледового режима осуществляется в виде монографий, режимно-справочных пособий и атласов.

Развитие физико-статистических методов долгосрочных ледовых прогнозов осуществляется по двум основным направлениям. Это – создание методов выбора информативных предсказателей и построения статистических прогностических схем, а также использование типизации ледовых условий, созданной на базе анализа многолетних рядов и диагноза типа развития ледовых процессов на основе сочетания различных определяющих факторов. В настоящее время наиболее разработанным и широко применяемым методом краткосрочных ледовых прогнозов является динамико-термодинамическое моделирование глобального или регионального масштаба. Разработанные методы ледовых прогнозов внедрены в оперативную практику ААНИИ, обладают хорошей информативностью, заблаговременностью и надежностью. Оправдываемость долгосрочных ледовых прогнозов в среднем составляет 80-85%, а краткосрочных 90-95% и не уступает успешности прогнозирования зарубежных ледовых служб. Успешно развивается эмпирико-статистическая модель движения судна для новых типов судов ледового класса. Разработана технология навигационных рекомендаций, критерием оптимальности маршрута являются минимальные затраты времени на плавание судна. Расчет затрат времени ледового плавания осуществляется с учетом прогнозируемого распределения ледяного покрова в период проведения морской операции.

© Ye.U. Mironov, S.V. Klyachkin, V.M. Smolyanitsky, A.V. Yulin, S.V. Frolov
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Благодарности

Статья подготовлена по результатам проектов программы «Исследование гидрометеорологических процессов в Мировом океане, морях и устьях рек России, Арктике и Антарктике» Росгидромета.

Список литературы:

1. Захаров В.Ф. Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеоиздат, 1996. 213 с.
2. Визе В.Ю. Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. М.: Изд. Главсевморпути, 1944. 273 с.
3. SIGRID format for Gridded Sea Ice Data (СИГРИД) – WMO Commission for Marine Meteorology Abridged final report of the tenth session. Paris, 8-17 February, 1989. WMO No.716 (http://wdc.aari.ru/wmo/docs/sigrid/WMO_716_rec_11%28SIGRID%29.pdf). SIGRID-3 (СИГРИД-3): A Vector Archive Format for Sea Ice Georeferenced Information and Data. - JCOMM Technical Report Series No. 24, 2004-2014, WMO/TD-No. 1214 (http://jcomm.info/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=4439).
4. Всемирная Метеорологическая Организация, 1989-2017. Номенклатура по Морскому Льду; ВМО, Но 259.
5. Sea Ice information services in the world (Ледовые информационные службы мира). WMO/TD, 2017 - No.574.
6. Meier, W., F. Fetterer, K. Knowles, M. Savoie, M. J. Brodzik. 2006, updated quarterly. Sea ice concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I passive microwave data, [1978.10.26 -2018.05.31]. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. Digital media.
7. Миронов Е.У., Гудошников Ю.П., Смирнов В.Н. Современные методы ледовых исследований и изысканий на шельфе арктических морей. // Проблемы Арктики и Антарктики, 2015. № 1 (103). С. 57–68.
8. Фролов С.В., Третьяков В.Ю., Клейн А.Э., Алексеева Т.А., Пряхин С.С. Результаты наблюдений за толщиной ледяного покрова по данным высокоширотных арктических морских экспедиций. // Вклад России в Международный полярный год 2007/2008. Океанография и морской лед. М.–СПб. Paulsen. 2011. С. 374–385.
9. Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г., Сметанникова А.В., Спичкин В.А. Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. Л.: Гидрометеоиздат. 1972. 348 с.
10. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалёв Е.Г., Смоляницкий В.М. Научные исследования в Арктике. Том 2. Климатические изменения ледяного морей Евразийского шельфа. СПб.: Наука. 2007. 136 с.
11. Johannessen O.M., Alexandrov V.Yu., Frolov I.Ye., Sandven S., Pettersson L.H., Bobylev L.P., Kloster K., Smirnov V., Mironov Ye.U., Babich N.G. Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route. Studies and Applications. Springer. Praxis Publishing. UK. 2007. 472 p.
12. Миронов Е.У. Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб. Изд. ААНИИ 2004. 320 с.
13. Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей. / Под ред. А.И. Данилова, Е.У. Миронова, В.А. Спичкина. СПб. Изд. ААНИИ. 2004. 432 с.
14. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН. 2017. 640 с.
15. Карелин И.Д., Карклин В.П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века. СПб. Изд. ААНИИ. 2012. 180 с.
16. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике. / Под ред. Е.У. Миронова – СПб. Изд. ААНИИ. 2010. 320 с.
17. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Поля дрейфа льда в Арктическом бассейне при типовых барических ситуациях. / Справочное пособие. СПб. Изд. ААНИИ. 2008. 35 с.
18. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Средние многолетние характеристики крупных нарушений сплошности льда в Карском море и в северо-восточной части Баренцева моря. / Справочное пособие. СПб. Изд. ААНИИ. 2014. 36 с.
19. Arctic Climatology Project, 2000. Environmental Working Group Joint U.S. Russian Sea Ice Atlas. Edited by F. Tanis and V. Smolyanitsky. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center. CD.
20. Атлас гидрометеорологических и ледовых условий морей Российской Арктики: Обобщение фондовых материалов и экспедиционных исследований ООО «Арктический Научно-Проектный Центр Шельфовых Разработок» в 2012–2014 гг. – М.: Издательство «Нефтяное хозяйство», 2015. – 128 с.
21. Национальный атлас Арктики. М.: Росреестр, 2017 — 496 с.
22. Егоров А.Г., Спичкин В.А. Метод локально-генетической типизации ледовых условий // Тр. ААНИИ. 1994. Т. 432. С.146-163.
23. Карклин В.П., Карелин И.Д., Юлин А.В. Метод прогноза сроков окончательного разрушения припая в районах восточной части моря Лаптевых заблаговременностью до одного месяца. Информационный сборник. Гидрометцентр России. № 40. 2013. С.97-114.
24. Ковалев Е.Г., Третьяков В.Ю., Юлин А.В. Опыт использования модернизированного метода анализа ледовых процессов на основе совмещения ГИС-технологий с АПС "Пегас" на примере морей Северной Атлантики. Труды ААНИИ, т. 445, 2002, с. 24-30.

25. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В. Метод долгосрочного прогноза типа ледовых условий в зимний период для районов Карского моря. Информационный сборник. Гидрометцентр России. № 44. 2017. С.113-125.
26. Николаева А.Я., Шестериков Н.П. Метод расчета ледовых условий (на примере моря Лаптевых). - Тр. ААНИИ, 1970, т.292, с.143-217.
27. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. Л., Гидрометеоиздат, 1975, 319 с.
28. Semtner A.J. A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate // J. Phys. Oceanogr. 1976. Vol. 6. P. 379–389.
29. Hibler, W.D., III. A dynamic thermodynamic sea ice model. J. Phys. Oceanogr. 1979, №9, p.815-846.
30. Фролов И.Е. Численная модель осенне-зимних ледовых явлений. - Тр. ААНИИ, 1981, т.372, с.73-81.
31. Макштас А.П. Тепловой баланс арктических льдов в зимний период. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 67 с.
32. Аппель И.Л., Гудкович З.М. Численное моделирование и прогноз эволюции ледяного покрова арктических морей в период таяния. - Л., Гидрометеоиздат, 1992, 143 с.
33. Hunke E.C., Dukowicz J.K. An Elastic-Viscous-Plastic Model for Sea Ice Dynamics // J. Phys. Oceanogr. 1997. Vol. 27. P. 1849–1867.
34. Lensu M., Haapala J., Lehtiranta J, Eriksson P., Kujala P., Suominen M., Merd A., Vedenpaa L., Kouts T., Lilover M.-J. Forecasting of compressive ice conditions. Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2013, June 9-13, Espoo, Finland, http://www.poac.com/Papers/2013/author_index.htm
35. Tang C., Dunlap E. An Ice-ocean Forecasting System for Eastern Canadian Waters. Proceedings of the 20th Conference of International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2010, Beijing, China, Vol.1, p.1256-1260.
36. Posey P.G., Hebert D.A., Metzger E.J., Wallcraft A.J., Cummings J.A., Preller R.H., Smedstad O.M., Phelps M.W. Real-time Data Assimilation of Satellite Derived Ice Concentration into the Arctic Cap Nowcast/Forecast System (ACNFS) // OCEANS, 2011. – IEEE, 2011. – p. 1-4.
37. Клячкин С.В., Гудкович З.М., Гузенко Р.Б., Май Р.И. Численная модель прогноза распределения льдов в юго-западной части Охотского моря заблаговременностью 1-5 суток. Труды Гидрометцентра России, 2015, вып. 353, с.63-87
38. Клячкин С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И. Численная модель эволюции ледяного покрова арктических морей для оперативного прогнозирования, «Лед и снег», 2015, т.55, №3, С.83-96.
39. Клячкин С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И., Саперштейн Е.Б., Сергеева И.А., Ярославцева С.И. Численное моделирование динамики ледяного покрова в районе архипелага Шпицберген. «Метеорология и гидрология», 2017, №9, с.108-118.
40. Е.У. Миронов, В.Г. Смирнов, И.А. Бычкова, С.В. Клячкин, Л.Н. Дымент, Н.Ю. Захваткина, Р.И. Май, Р.Б. Гузенко, Е.Б. Саперштейн, С.В. Михальцева, Е.В. Платонова, Л.А Старцев. Экспериментальный аппаратно-программный комплекс спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки. Проблемы Арктики и Антарктики, 2017, №2 (112), с.15-27.
41. Клячкин С.В. Моделирование эволюции припая в Арктических морях. Метеорология и гидрология, 2011, №1, с.92-101.
42. Olason E., Boullion S., Rampal P. Sea ice model developments in view of oil spill forecasting. Joint Industry Programme «Arctic Response Technology», February 17, 2016.
43. Бузуев А.Я. Влияние природных условий на судоходство в замерзающих морях. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 200 с.
44. Фролов С.В., Федяков В.Е., Алексеева Т.А., Пряхин С.С. Практические результаты гидрометеорологического обеспечения круглогодичного плавания судов ОАО «ГМК «Норильский никель» в Западном районе Арктики. Труды международной научно-практической конференции «80 лет с начала планомерного изучения и развития Севморпути». 2013. С. 112–118.
45. Макаров Е.И. Применение системных методов для составления специализированных прогнозов ледовых условий плавания. Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3 (97). С. 15–20.
46. Федяков В.Е., Фролов С.В. Новые алгоритмы учета влияния ледовых образований на надежность движения судов во льдах. Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. №3 (97). С. 28–34
47. Третьяков В.Ю., Фролов С.В. Модель оценки риска транспортных операций в условиях ледяного покрова. Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3(97). С. 21–27.

References:

1. Zakharov V.F. Sea ice in the climatic system. SPb. Gidrometeoizdat (Hydrometeorological Publ.), 1996, 213 p. [In Russian].
2. Vize V.Yu. The basis of long-range ice forecasts for the Arctic seas. Moscow, Glavsevmorput Publ. (Publ. of Main Administration of the North Sea Route), 1944, 273 p. [In Russian].
3. SIGRID format for Gridded Sea Ice Data (СИГРИД) – WMO Commission for Marine Meteorology Abridged final report of the tenth session. Paris, 8-17 February, 1989. WMO No.716 - http://wdc.aari.ru/wmo/docs/sigrid/WMO_716_rec_11%28SIGRID%29.pdf. SIGRID-3 (СИГРИД-3): A Vector Archive Format for Sea Ice Georeferenced Information and Data. - JCOMM Technical Report Series No. 24, 2004-2014, WMO/TD-No. 1214 (http://jcomm.info/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=4439).
4. World Meteorological Organization, 1989-2017. Sea ice Nomenclature; WMO, No. 259.

© Ye.U. Mironov, S.V. Klyachkin, V.M. Smolyanitsky, A.V. Yulin, S.V. Frolov
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

5. Sea Ice information services in the world. WMO/TD, 2017 - No.574.
6. Meier, W., F. Fetterer, K. Knowles, M. Savoie, M. J. Brodzik. 2006, updated quarterly. Sea ice concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I passive microwave data, [1978.10.26 -2018.05.31]. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. Digital media.
7. Mironov Ye.U., Gudoshnikov Yu.P., Smirnov V.N. Modern methods of ice studies and surveys at the Arctic seas offshore. Problemy Arktiki i Antarktiki (Arctic and Antarctic Research), 2015, № 1 (103). p. 57–68. [In Russian].
8. Frolov S.V., Tretiakov V.Yu., Klein A.E., Alekseyeva T.A., Pryakhin S.S. Results of ice thickness observations using the data of high-latitude Arctic marine expeditions. Russia's contribution in the International Polar Year 2007/2008. Oceanography and sea ice. Moscow-SPb,. Paulsen. 2011. P. 374–385. [In Russian].
9. Gudkovich Z.M., Kirillov A.A., Kovalev Ye.G., Smetannikova A.V., Spichkin V.A. The basis of the methodology of long-range ice forecasts for the Arctic seas. Leningrad, Gidrometeoizdat (Hydrometeorological Publ.). 1972. 348 p. [In Russian].
10. Frolov I.Ye., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev Ye.G., Smolyanitsky V.M. Scientific studies in the Arctic. Vol.2. Climatic changes of ice cover of the Eurasian offshore seas. SPb.: Nauka (Science). 2007. 136 p. [In Russian].
11. Johannessen O.M., Alexandrov V.Yu., Frolov I.Ye., Sandven S., Pettersson L.H., Bobylev L.P., Kloster K., Smirnov V., Mironov Ye.U., Babich N.G. Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route. Studies and Applications. Springer. Praxis Publishing. UK. 2007. 472 p.
12. Mironov Ye.U. Ice conditions in the Greenland and Barents Seas and their long-range forecast. SPb. AARI Publ. 2004. 320 p. [In Russian].
13. Variability of natural conditions in the offshore zone of the Barents and Kara Seas. / Ed. Danilov A.I., Mironov Ye.U., Spichkin V.A. SPb. AARI Publ. 2004. 432 p. [In Russian].
14. Dumanskaya I.O. Ice conditions of the seas of Russia's Asian part. Moscow. Obninsk: IG-SOTSIN. 2017. 640 p. [In Russian].
15. Karelin I.D., Karklin V.P. Landfast ice and flaw polynyas of the Arctic seas of Siberian offshore in late XX – early XXI century. SPb. AARI Publ. 2012. 180 p. [In Russian].
16. Ice phenomena threating Arctic shipping / Ed. Mironov Ye.U. – SPb. AARI Publ. 2010. 320 p. [In Russian].
17. Gorbunov Yu.A., Losev S.M., Dyment L.N. Ice drift patterns in the Arctic Basin at typical baric situations. / Reference manual. SPb. AARI Publ. 2008. 35 p. [In Russian].
18. Gorbunov Yu.A., Losev S.M., Dyment L.N. Multi-year mean characteristics of large ice fractures in the Kara Sea and in the north-eastern Barents Sea. / Reference manual. SPb. AARI Publ. 2014. 36 p. [In Russian].
19. Arctic Climatology Project, 2000. Environmental Working Group Joint U.S. Russian Sea Ice Atlas. Edited by F. Tanis and V. Smolyanitsky. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center. CD.
20. Atlas of the hydrometeorological and ice conditions of the seas of Russian Arctic: Generalization of the archive materials and field studies of the "Arctic Scientific-Designing Center of the Offshore Development" Ltd in 2012-2013. – Moscow.: Neftyanoye Khozyaistvo (Oil Industry). 2015. 128 p. [In Russian].
21. National atlas of the Arctic. Moscow.: Rosreyestr (Russian Registry). 2017. 496 p. [In Russian].
22. Yegorov A.G., Spichkin V.A. Method of the local-genetic classification of ice conditions // Proc. AARI. 1994. Vol. 432. p. 146-163. [In Russian].
23. Karklin V.P., Karelin I.D., Yulin A.V. Method of forecast of the landfast ice final break-up in the eastern Laptev Sea with advance period up to one month. Information sourcebook. Gidromettsentr Rossii (Russia's Hydrometeorological Center). No. 40. 2013. P.97-114. [In Russian].
24. Kovalev Ye.G., Tretiakov V.Yu., Yulin A.V. Experience of using the modified method of ice processes analysis based on combination the GIS technologies and automated forecast system "PEGAS" on the example of the North Atlantic seas. Proc. AARI. Vol.445. 2002. p.24-30. [In Russian].
25. Karklin V.P., Khotchenkov S.V., Yulin A.V. Method of the long-range forecast of ice conditions type in the Kara Sea regions in winter. Information sourcebook. Gidromettsentr Rossii (Russia's Hydrometeorological Center). No. 44. 2017. P.113-125. [In Russian].
26. Nikolayeva A.Ya., Shesterikov N.P. Method of ice conditions calculation (on the example of the Laptev Sea). Proc. AARI/ 1970. Vol. 292. p.143-217. [In Russian].
27. Doronin Yu.P., Kheisin D.Ye. Sea ice. Leningrad.: Gidrometeoizdat (Hydrometeorological Publ.). 1975. 319 p. [In Russian].
28. Semtner A.J. A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate // J. Phys. Oceanogr. 1976. Vol. 6. P. 379–389.
29. Hibler, W.D., III. A dynamic thermodynamic sea ice model. J. Phys. Oceanogr. 1979, №9, p.815-846.
30. Frolov I.Ye. Numerical model of autumn-winter ice phenomena. Proc. AARI. 1981. Vol. 372. P.73-81. [In Russian].
31. Makshtas A.P. Heat budget of the Arctic ice in winter. Leningrad: Gidrometeoizdat (Hydrometeorological Publ.), 1984, 67 p. [In Russian].
32. Appel I.L., Gudkovich Z.M. Numerical modeling and forecast of the Arctic seas ice cover evolution in melting period. Leningrad: Gidrometeoizdat (Hydrometeorological Publ.), 1992, 143 p. [In Russian].
33. Hunke E.C., Dukowicz J.K. An Elastic-Viscous-Plastic Model for Sea Ice Dynamics // J. Phys. Oceanogr. 1997. Vol. 27. P. 1849–1867.
34. Lensu M., Haapala J., Lehtiranta J, Eriksson P., Kujala P., Suominen M., Merd A., Vedenpaa L.,

Kouts T., Lilover M.-J. Forecasting of compressive ice conditions. Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2013, June 9-13, Espoo, Finland, http://www.poac.com/Papers/2013/author_index.htm
35. Tang C., Dunlap E. An Ice-ocean Forecasting System for Eastern Canadian Waters. Proceedings of the 20th Conference of International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2010, Beijing, China, Vol.1, p.1256-1260.
36. Posey P.G., Hebert D.A., Metzger E.J., Wallcraft A.J., Cummings J.A., Preller R.H., Smedstad O.M., Phelps M.W. Real-time Data Assimilation of Satellite Derived Ice Concentration into the Arctic Cap Nowcast/Forecast System (ACNFS) // OCEANS, 2011. – IEEE, 2011. – p. 1-4.
37. Klyachkin S.V., Gudkovich Z.M., Guzenko R.B., May R.I. Numerical model of ice cover distribution forecast in the south-western Sea of Okhotsk with advance period of 1-5 days. Proc. Russia's Hydrometeorological Center. 2015. Iss. 353. p. 63-87. [In Russian].
38. Klyachkin S.V., Guzenko R.B., May R.I. Numerical model of the Arctic seas ice cover evolution for the operational forecasting. Lyod i sneg (Ice and snow). 2015. Vol.55. No. 3. p. 83-96.
39. Klyachkin S.V., Guzenko R.B., May R.I., Sapershtein Ye.B., Sergeyeva I.A., Yaroslavtseva S.I. Numerical modeling of ice cover dynamics in the region of Spitsbergen. Meteorologiya i gidrologiya (Meteorology and hydrology). 2017. No.9. p.108-118. [In Russian].
40. Mironov Ye.U., Smirnov V.G., Bychkova I.A., Klyachkin S.V., Dyment L.N., Zakhvatkina N.Yu., May R.I., Guzenko R.B., Sapershtein Ye.B., Mikhaltseva S.V., Platonova Ye.V., Startsev L.A. Experimental hardware-software complex of satellite monitoring and forecast of ice conditions. Problemy Arktiki i Antarktiki (Arctic and Antarctic Research). 2017. No.2 (112). P.15-27. [In Russian].
41. Klyachkin S.V. Modeling of landfast ice evolution in the Arctic seas. Meteorologiya i gidrologiya (Meteorology and hydrology). 2011. No.1. p.92-101. [In Russian].
42. Olason E., Boullion S., Rampal P. Sea ice model developments in view of oil spill forecasting. Joint Industry Programme «Arctic Response Technology», February 17, 2016.
43. Buzuyev A.Ya. Influence of natural conditions on the navigation in freezing seas. Leningrad, Gidrometeoizdat (Hydrometeorological Publ.). 1982. 200 p. [In Russian].
44. Frolov S.V., Fedyakov V.Ye., Alekseyeva T.A., Pryakhin S.S. Practical results of the hydrometeorological support of the year-round navigation of the "Norilsky Nikel" Public Corporation vessels in the Western Arctic. Proc. of the international scientific-practical conference "80 years of regular studying and development of the North Sea Route". 2013. P.112-118. [In Russian].
45. Makarov Ye.I. Applying of the system methods for issuing the specialized forecasts of ice conditions of navigation. Problemy Arktiki i Antarktiki (Arctic and Antarctic Research). 2013. No.3 (97). P.15-20. [In Russian].
46. Fedyakov V.Ye., Frolov S.V. New algorithms for taking into account the ice features influence on reliability of vessel motion in ice. Problemy Arktiki i Antarktiki (Arctic and Antarctic Research). 2013. No.3 (97). P.28-34. [In Russian].
47. Tretiakov V.Yu., Frolov S.V. Model of the risk assessment of transport operations in ice cover conditions. Problemy Arktiki i Antarktiki (Arctic and Antarctic Research). 2013. No.3 (97). P.21-27. [In Russian].

© Ye.U. Mironov, S.V. Klyachkin, V.M. Smolyanitsky, A.V. Yulin, S.V. Frolov
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)