

Исследование ледовых процессов в Арктике для разработки моделей и методов прогнозирования ледовых условий, необходимых для обеспечения судоходства в акватории Северного морского пути*

Е.У. Миронов, С.В. Клячкин, А.В. Юлин, Р.И. Май, Е.А. Павлова

Рассматриваются термические и динамические процессы, обуславливающие формирование, нарастание и динамику ледяного покрова. Показана значимость исследования опасных ледовых явлений, таких как интенсивный дрейф льда, сжатие и торошение льдов. Дано краткое описание модели эволюции ледяного покрова, использующейся для краткосрочного прогнозирования ледовой обстановки. Приведен анализ многолетней изменчивости площади ледяного покрова для Северного Ледовитого океана в целом и для отдельных арктических морей. Приведены основные принципы типизации ледовых условий для зимнего и летнего периода. Дано краткое описание краткосрочных (до 5 суток) и долгосрочных (до 30 суток) методов прогнозов. Показана практическая реализация прогнозов типов ледовых условий, которые используются в Администрации Северного морского пути для выдачи разрешений плавания судов в акватории СМП.

Ключевые слова: морской лед, ледовые явления, методы прогнозов, арктические моря.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-60109).

Введение

Главной особенностью гидрометеорологического режима Северного Ледовитого океана является наличие ледяного покрова, который сохраняется в течение всего года. Морские льды, взаимодействуя с атмосферой и океаном, формируют основные компоненты климатической системы Арктики [1]. Основой мониторинга ледяного покрова в настоящее время являются космические средства дистанционного зондирования [2]. Быстрое расширение объема морских перевозок в акватории Северного

морского пути (СМП) и активное освоение лицензионных участков континентального шельфа российских арктических морей в современный период обуславливает большую практическую значимость исследований ледяного покрова и разработку методов ледовых прогнозов.

Особое внимание необходимо уделять исследованию опасных ледовых явлений, которые в современных условиях изменения климата стали наблюдаться с повышенной повторяемостью. Опасные ледовые явления – это активные воздействия дрейфующих морских льдов, которые формируются динамическими факторами, возникают внезапно, действуют в ограниченном районе и в ограниченный период времени [3].

Некоторые из перечисленных вопросов находятся в центре внимания исследования, выполненного



МИРОНОВ
Евгений Уарович
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



КЛЯЧКИН
Сергей Владимирович
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



ЮЛИН
Александр Викторович
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



МАЙ
Руслан Игоревич
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



ПАВЛОВА
Евгения Анатольевна
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт

при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект «Формирование и эволюция опасных ледовых явлений и ледяных образований в Арктике при современных изменениях климата»). В рамках этого проекта рассматривались следующие задачи:

1. Исследование процессов формирования опасных ледовых явлений (интенсивный дрейф, сжатия льдов, вынос тяжелых льдов) и опасных ледяных образований (айсберги, торосы, стамухи, многолетние ледяные поля).
2. Исследование динамики и морфометрии опасных ледяных образований (торосы, стамухи, айсберги) на основе дистанционного зондирования Земли из космоса, математического моделирования и статистического анализа.
3. Анализ пространственно-временной изменчивости опасных ледовых явлений и ледяных образований.

Исследование ледовых процессов

Охлаждение деятельного слоя моря и перенос тепла внутри водной толщи описываются с помощью уравнений диффузии тепла и солей с соответствующими граничными условиями на дне, на поверхности моря, на твердых и открытых границах. Для описания термического нарастания и таяния льда используется уравнение теплового баланса ледяной пластины, при этом также формулируются граничные условия на верхней и нижней поверхностях льда. Движение водных масс и льдов имитируется с помощью уравнений баланса количества движения при соблюдении условия баланса масс.

Таким образом, можно констатировать, что основные черты динамики и термодинамики ледяного покрова, подчиняющиеся базовым законам физики, принципиально исследованы и в целом понятны. Тем не менее, многие частные вопросы требуют более глубокого изучения. В частности, сохраняет актуальность весь комплекс проблем, связанных с прогнозированием состояния ледяного покрова, причем это относится к прогнозам любой заблаговременности – от краткосрочных (до пяти суток) до долгосрочных (более 15 суток). Также требуют исследования экстремальные проявления динамики ледяного покрова, причем в данном вопросе очень важен масштаб рассмотрения явления. Формирование и эволюция ледяных образований играет очень существенную роль при строительстве и эксплуатации инженерных объектов на шельфе, поэтому изучение айсбергов, торосов, стамух и т. д. является одним из наиболее актуальных разделов ледоведения.

Описание математической модели эволюции ледяного покрова

Опираясь на существующие представления о физических механизмах, управляющих термическими и динамическими процессами в ледяном покрове, можно построить математическую модель, имитирующую его эволюцию. Понятно, что вариантов математических моделей эволюции ледяного покрова может быть очень много, и специфика каждого варианта определяется в первую очередь тем, какие задачи он призван решать. В частности, математическая модель эволюции ледяного покрова может использоваться для составления кратко- и среднесрочных ледовых прогнозов. В этом случае модель включает уравнения, описывающие динамику и термодинамику океана и ледяного покрова, а состояние атмосферы задается как заранее известный параметр, что, безусловно, существенно упрощает задачу. Однако применение модели для составления прогнозов в оперативном режиме накладывает технологические требования, а именно:

- модель должна опираться на регулярно доступные исходные данные и автоматически их усваивать;
- модель должна представлять результаты прогноза в различных видах (форматах) для максимально полного удовлетворения требований потребителя;
- модель должна обладать удобным интерфейсом, сводящим к минимуму вероятность человеческой ошибки.

Модель эволюции ледяного покрова, разработанная в ААНИИ в 2000-х годах, в значительной степени отвечает указанным требованиям. В течение последних 15 лет эта модель широко используется для составления оперативных ледовых прогнозов в арктических морях России заблаговременностью до пяти су-

ток, и показала весьма удовлетворительные результаты: оправдываемость в среднем составляет 90–95% при устойчивой положительной эффективности [4, 5].

В качестве океанского блока в модели ААНИИ используется модель Принстонского университета (Princeton Ocean Model, модель ПОМ) [6, 7]. Главной особенностью этой модели является описание вертикальной структуры океана с помощью так называемых σ -координат, то есть фиксированного количества слоев, толщина которых переменна и зависит от глубины места. Система уравнений модели включает уравнения движения, неразрывности, баланса турбулентной энергии, диффузии тепла и солей. Для оптимизации расчета в модели ПОМ разделены вертикально интегрированные уравнения (баротропный модуль) и уравнения вертикальной структуры (бароклинный модуль). Уравнения баротропной скорости получены интеграцией по глубине уравнений бароклинного модуля, тем самым устраняется вся вертикальная структура.

На открытой границе для баротропной моды задаются функция расхода воды и приливные явления, предвычисленные по гармоническим постоянным восьми главных приливных волн [8], для бароклинной моды используется условие излучения [7, 9]. Условия на границе «океан–атмосфера» определяются потоками тепла (турбулентными и радиационными) и обменом импульсом [10–12].

Термическая эволюция ледяного покрова основывается на уравнении теплового баланса двухслойной среды «лед–снег» [13]. В период нарастания толщины льда задача решается аналитически при следующих допущениях:

- вертикальные профили температуры льда и температуры снега в период ледообразования считаются линейными, что характерно для молодых и однолетних льдов;

- потоки тепла через лед и через снег считаются одинаковыми;
- толщина снега определяется по толщине льда с помощью эмпирических соотношений.

В период таяния ледяного покрова учитывается наличие снега на льду, а также изменение альбедо снежно-ледяного покрова в процессе таяния. Сток пресной воды в море определяется толщиной слоя растаявшего льда.

Динамика ледяного покрова рассчитывается на основе уравнения движения, где в правой части присутствуют слагаемые, описывающие: касательные напряжения на верхней и нижней поверхностях льда; силу Кориолиса; силу, обусловленную наклоном уровня; силу внутреннего взаимодействия в ледяном покрове.

Напряжения на поверхностях льда, обусловленные воздействием ветра и течений, оцениваются с помощью известного квадратичного закона [14], при этом коэффициенты трения зависят от торосистости льда. Сила Кориолиса и проекция силы тяжести на поверхность моря задаются традиционно.

В данной модели считается, что ледяной покров проявляет свойства, характерные для вязко-пластических сред. Вязкое взаимодействие в ледяном покрове подробно рассмотрено в работе [15]. Согласно этой работе, сила внутреннего взаимодействия пропорциональна дивергенции внутренних напряжений. Внутренние напряжения $\dot{\epsilon}_{\xi\xi}$, $\dot{\epsilon}_{\chi\chi}$, соответствующие главным осям тензора скоростей деформаций, рассчитываются по формуле:

$$\sigma_{\xi\xi} = K \cdot \dot{\epsilon}_{\xi\xi}, \quad \sigma_{\chi\chi} = K \cdot \dot{\epsilon}_{\chi\chi}. \quad (1)$$

Параметр K определяется следующим образом:

1) $K = K_0 \cdot H \cdot (3C - 2)$, при выполнении каждого из всех следующих условий:

- а) $C \geq 0.67$,
- б) $\text{div}\{\vec{W}\} \leq 0$,
- в) $\dot{\epsilon}_{\xi\xi} < 0$, либо $\dot{\epsilon}_{\chi\chi} < 0$;

2) $K = 0$ при невыполнении хотя бы одного из условий (2).

Константы и переменные уравнений: $K_0 = 1.2 \cdot 10^{10} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, $\dot{\epsilon}_{\xi\xi}$, $\dot{\epsilon}_{\chi\chi}$ – инварианты тензора скоростей деформаций, соответствующие осям ξ – χ эллипса деформаций; C – сплоченность льда; W – скорость дрейфа.

Отличительной особенностью деформирования пластических сред является наличие порогового

механизма, то есть среда деформируется при достаточно больших внешних нагрузках. Если напряжения в ледяном покрове превышают некоторый предел, то в этом случае модель допускает возможность торошения, то есть накопления «лишнего» объема льда в пределах некоторой площади (ячейки сетки). В данном случае этот предел оценивается как устойчивость ледяной пластины, лежащей на упругом основании, по отношению к продольному изгибу [16]. Если напряжение недостаточно, то, чтобы накопления лишнего объема не происходило, применяется специальный искусственный прием, заключающийся в итеративной коррекции поля дрейфа в соответствии с условием неотрицательной дивергенции.

Описанный принцип, по существу, имитирует пластическое поведение ледяного покрова.

На твердой границе при нажимном дрейфе нормальная к берегу компонента равна нулю, касательная компонента дрейфа трансформируется в зависимости от угла между направлением дрейфа и направлением береговой черты. На кромке льда напряжения равны нулю.

На границах расчетной области при дрейфе, направленном внутрь расчетной области, градиенты сплоченности (общей и частной) и скорости равны нулю; при выносном дрейфе градиенты сплоченности и скорости на границе равны соответствующим градиентам в ближайшей внутренней ячейке.

Численная схема модели построена на основе равноплощадных сеток, причем пространственный шаг сетки может варьироваться от 5 до 50 км в зависимости от размеров модельной области. Временной шаг модели составляет:

- в океанском блоке для баротропного модуля – 5 секунд, для бароклинного – 2.5 минуты;
- в ледовом блоке для расчета динамики – 10 минут, для расчета теплового нарастания (таяния) – 1 час.

Временная дискретность обмена условиями между льдом и океаном составляет 1 час. Перед выполнением собственно прогностического расчета осуществляется «разгон» океана, продолжительность которого составляет 10 приливных циклов.

Ледяной покров представлен набором маркеров, каждый из которых характеризуется пространственными координатами в декартовой системе, толщиной, прибавкой толщины за счет торосов и скоростью. Перемещение и термическое изменение толщины рассчитывается отдельно для каждого маркера. Количество возрастных градаций льда принято равным шести (молодой лед, однолетний тонкий, однолетний средний, однолетний толстый, двухлетний и многолетний лед).

Силы внутреннего взаимодействия, возникающие

при дрейфе, считаются одинаковыми в пределах ячейки. Выторашиваемые маркеры исключаются из дальнейшего расчета, а их суммарная толщина равномерно распределяется среди оставшихся маркеров данной ячейки как прибавка толщины за счет торосов. Соотношение толщины ровного льда и прибавки толщины, обусловленной торосами, определяет торосистость данного маркера, которая, как отмечалась выше, учитывается при расчете тангенциальных напряжений на поверхностях льда.

Главным источником первичных фактических данных по ледяному покрову в настоящее время являются спутниковые снимки в различных спектральных диапазонах и с различной разрешающей способностью, на основе которых составляются электронные ледовые карты в соответствии с международным стандартом передачи ледовых данных SIGRID-3. Если на фактической ледовой карте есть зоны, по которым данные отсутствуют, такие пробелы восполняются из результатов предыдущего прогноза. Поскольку ледовые карты, построенные в соответствии со стандартом SIGRID-3, не содержат информации о толщине, торосистости и разрушенности льда в явном виде, то значения этих характеристик берутся из результатов предшествующего расчета (прогноза).

Подготовка гидрологических данных заключается в применении специальной процедуры согласования результатов предыдущего прогноза, температуры и солености воды с фактическим распределением ледяного покрова на момент составления нового прогноза.

В качестве данных метеорологического форсинга используются результаты глобальной модели атмосферы Глобальной Прогностической Системы США (Global Forecasting System, GFS). Эти данные представляют собой бинарные матрицы прогностических полей приземной температуры воздуха и атмосферного

давления на уровне моря в регулярной сферической сетке с шагом $0/5^\circ$, временной дискретностью 3 часа и заблаговременностью от 0 (диагноз) до 168 часов.

Модель позволяет получать ожидаемые значения основных параметров ледяного покрова (сплошенность, толщина, дрейф, сжатие, торосистость, разрушенность) и океана (температура, соленость, течение, уровень моря) в ячейках регулярной сетки на заданные моменты времени. Для наглядного представления результатов прогноза применяются различные программные средства, в том числе современные ГИС (геоинформационные системы) и ЭКНИС (электронные навигационно-картографические информационные системы).

Изменчивость ледовых условий арктических морей России в современном климатическом периоде

Климатические колебания в Арктике в наблюдаемой ретроспективе близки к 60–65-летним циклам с выделяющимися приблизительно 30–35-летними периодами относительного «похолодания» и «потепления». При анализе изменчивости аномалий среднегодовой температуры воздуха в широтной зоне $70\text{--}85^\circ\text{с.ш.}$ установлено, что периоды относительного «похолодания» наблюдались в начале XX века до середины 20-х гг. и далее в период с середины 50-х гг. до конца 80-х. Периоды относительного «потепления» на-

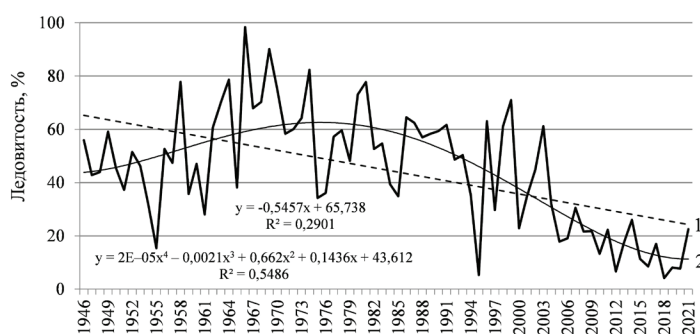


Рис. 1. Межгодовая изменчивость ледовитости Карского моря в августе в период 1946–2021 гг. Линии трендов: 1 – линейный, 2 – полиномиальный.

блюдались с середины 20-х гг. прошлого столетия до середины 50-х гг. и с конца 80-х гг. по настоящее время [17, 1, 3]. На основе этого в рассматриваемой работе выделяются условно «холодный» период – 1959–1989 гг., и условно «теплый» – 1990–2020 гг.

В качестве исходного материала для анализа были использованы данные из пополняемого архива ледовитости морей ААНИИ [18]. Выполнен анализ данных ледовитости российских арктических морей, начиная с 1946 г. по 2021 г. (длина рядов наблюдений 76 лет). Значения ледовитости выражены в относительных единицах (доля покрытия ледяным покровом акватории моря, %). В качестве примера рассмотрим многолетнюю изменчивость ледовитости в западном районе (Карское море) и восточном районе (Восточно-Сибирское море) акватории СМП.

Изменчивость ледовитости Карского моря

На рис. 1 приведен график межгодовой изменчивости ледовитости Карского моря в августе. За период с 1946 г. по настоящее время наблюдается хорошо выраженный линейный тренд уменьшения ледовитости, который составил около 30% за весь ряд наблюдений, или почти 4% в десятилетие.

В настоящее время наблюдается повторение периода пониженной ледовитости (с начала 1990-х гг. по настоящее время), которое является более аномальным, чем в 1940-е гг. В таблице 1 приведены

Таблица 1. Основные статистические характеристики изменчивости ледовитости Карского моря в летний сезон за различные временные периоды, %

Показатели	Месяц, декада								
	VII-1	VII-2	VII-3	VIII-1	VIII-2	VIII-3	IX-1	IX-2	IX-3
«Холодный» период 1959–1989 гг.									
Среднее значение	89	85	77	66	54	46	37	33	32
«Теплый» период 1990–2020 гг.									
Среднее значение	73	64	49	39	30	23	20	18	17
Разность*	15	21	29	26	23	22	17	15	15

* Разность между средними значениями в «холодный» и «теплый» периоды.

Таблица 2. Основные статистические характеристики изменчивости ледовитости Восточно-Сибирского моря в летний сезон в различные временные периоды, %

Показатели	Месяцы, декады								
	VII-1	VII-2	VII-3	VIII-1	VIII-2	VIII-3	IX-1	IX-2	IX-3
«Холодный» период 1959–1989 гг.									
Среднее значение	96	95	92	88	82	77	73	70	69
«Теплый» период 1990–2020 гг.									
Среднее значение	93	89	82	66	57	46	38	33	31
Разность*	3	6	10	22	25	31	35	38	38

* Разность между средними значениями в «холодный» и «теплый» периоды.

Таблица 3. Количество случаев (N) и повторяемость (P) типов различных типов ледовых условий в российских арктических морях за период 2000–2020 гг., %

Тип ледовых условий	Моря							
	Карское		Лаптевых		Восточно-Сибирское		Чукотское	
	N	P, %	N	P, %	N	P, %	N	P, %
Тяжелый	1	5	1	5	1	5	1	5
Легкий	4	20	9	45	10	50	13	65
Средний	15	75	10	50	9	45	6	30

оценки основных статистических характеристик ледовитости Карского моря за весь ряд наблюдений и за различные временные периоды.

Из приведенных данных следует, что в последнее 30-летие средняя ледовитость в каждую декаду летнего периода стала меньше на 15–29%. Наиболее значительные уменьшения ледовитости между «холодным» и «теплым» периодами наблюдаются с конца июля до конца августа и составляют 22–29%. В целом ледовитость моря в конце летнего сезона (в сентябре) в «холодный» период составляла 32–33%, а в последний «теплый» период уменьшилась до 17–18% (практически в два раза).

Изменчивость ледовитости Восточно-Сибирского моря

Участок трассы СМП в восточной части Восточно-Сибирского моря всегда считался одним из наиболее сложных из-за большой ледовитости моря и сплоченных льдов Айонского ледяного мас-

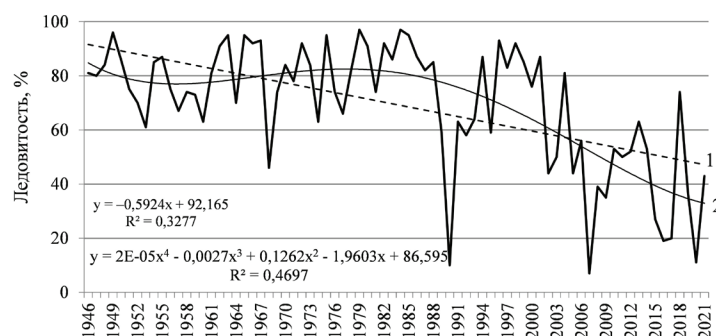


Рис. 2. Межгодовой ход ледовитости Восточно-Сибирского моря в августе 1946–2021 гг. Линии трендов: 1 – линейный, 2 – полиномиальный.

сива, которые часто блокируют прибрежный район плавания [19]. На рисунке 2 приведен график межгодовой изменчивости ледовитости Восточно-Сибирского моря в августе. Линейный тренд уменьшения ледовитости является наибольшим из всех выявленных в арктических морях. Сокращение площади льдов составляет около 40% за 76-летний ряд наблюдений, или почти 6% в десятилетие.

В таблице 2 приведены оценки основных статистических характеристик изменчивости ледовитости Восточно-Сибирского моря в летний сезон за различные временные периоды. Наиболее значительные уменьшения ледовитости моря между «холодным» и «теплым» периодом наблюдаются в сентябре и составляют 35–38%. В целом ледовитость моря в конце летнего сезона (в сентябре) в «холодный» период составляла 69–70%, а в «теплый» период 38% (то есть уменьшилась в 1,7 раза).

В табл. 3 приведена повторяемость тяжелого типа ледовых условий в российских арктических морях. Возникновение тяжелого типа обусловлено возможностью воз-

никновения таких опасных ледовых явлений, как раннее появление льда на акватории морей или выноса тяжелых и многолетних льдов на трассы плавания и районы работ в арктических морях России.

В результате исследования установлено, что за период наблюдений с середины прошлого века до настоящего времени наблюдается устойчивая тенденция уменьшения ледовитости во всех российских арктических морях. Ледовитость морей за последние 20 лет в августе–сентябре уменьшилась в полтора–два раза по сравнению с ледовитостью, наблюдаемой в XX в.

Очищение арктических морей в целом стало происходить раньше и быстрее на 20–30 дней, по сравнению с предыдущим «холодным» тридцатилетием. Увеличилась повторяемость полного очищения морей, а также увеличилась продолжительности безледного периода на 20–40 дней. Но самое главное – это то, что возникновение тяжелых типов ледовых условий уменьшилось в 4 раза и составляет не более 5% (один случай в 20 лет). Это означает, что значительно уменьшились возможность появления на трассах плавания тяжелых и многолетних льдов и повторяемость возникновения тяжелых ледовых условий во второй половине навигации (август–сентябрь).

Типизация ледовых условий арктических морей для летнего и зимнего периода

Типизация ледовых условий в арктических морях для выделения тяжелых, средних и легких ледовых условий является ключевой задачей для последующего анализа и прогнозирования возможности появления тяжелых и опасных ледовых условий на трассах плавания СМП. Учитывая принципиальные различия в формировании летних и зимних ледовых условий, типизации для каждого сезона года выполнялась отдельно.

Летний период

С началом таяния лед в прибрежных частях моря разрушается быстрее, чем в центральных и северных частях. Анализ изменения ледовитости и сплоченности льда в летний период в морях показывает, что прибрежные части морей, по которым проходят основные пути плавания судов, очищаются в более ранние сроки. С какого-то момента, несмотря на то, что в самом море, в центральной или северной его части наблюдаются льды, прибрежная часть моря становится свободной ото льдов. Как было установлено, это происходит с уменьшением ледовитости и площади сплоченных льдов до определенных значений. Определение этих значений для каждого района моря положено в основу типизации ледовых условий. В результате исследования установлены критические значения ледовитости и площади ледяного массива в каждом из арктических морей для оценки типа ледовых условий.

С учетом вышеназванного предлагается установить следующие критерии (граничные условия) для определения типов ледовых условий в арктических морях для летнего периода.

Легкий тип ледовых условий – на акватории моря, по которому проходят стандартные трассы плавания, наблюдаются чистая вода и редкие льды – сплоченность льда до трех баллов, при этом возможно наличие отдельных пятен, полос и зон редких и разреженных льдов, которые не должны превышать 10–20% общей протяженности пути плавания.

Средний тип ледовых условий – на акватории района моря, по которому проходят стандартные трассы плавания, преобладают льды, сплоченность которых составляет не более 6 баллов (редкие и разреженные льды), при этом возможно наличие отдельных пятен, полос и зон сплоченных льдов (сплоченностью 7–9 баллов), которые не должны превышать 10–20% общей протяженности пути плавания.

Тяжелый тип ледовых условий – на акватории района моря, по которому проходят стандартные трассы плавания, наблюдаются сплоченные и сплошные льды (сплоченностью более 7 баллов).

Выделение типов ледовых условий не по статистическим критериям (0.8σ), а по критерию очищения районов плавания ото льдов привело к обоснованному и понятному перераспределению и изменению сезонного хода условий тяжести. В начале летнего периода (в июле) во всех районах морей наблюдается абсолютное преобладание тяжелых ледовых условий, так как на судоходных трассах преобладают тяжелые сплоченные льды. В конце летнего периода, при очищении районов плавания ото льдов, значительно увеличивается повторяемость ледовых условий легкого типа.

Зимний период

Оцифровка ледовых карт и возможность последующего анализа их с помощью гео-информационных систем сделали возможным оценивать количество льдов различного возраста в период зимнего нарастания. Были рассчитаны данные по возрастному составу в зимний период за 1997–2020 гг. для всех арктических морей. В настоящее время установлены следующие критерии (граничные условия) для определения типов ледовых условий во всех арктических морях для зимнего периода [3, 20].

Легкий тип ледовых условий – на акватории района наблюдаются начальные, молодые и однолетние тонкие льды (до 0.7 м), возможно появление и присутствие однолетних средних льдов в количестве до 30% ($S_{\text{средн}} < 30\%$);

Средний тип ледовых условий – на акватории района наблюдаются однолетний средний лед (до 1.2 м) в количестве от 30% и более ($S_{\text{средн}} \geq 30\%$), возможно появление и присутствие однолетних толстых льдов в количестве до 30% ($S_{\text{толст}} < 30\%$);

Тяжелый тип ледовых условий – на акватории района наблюдаются однолетний толстый лед (более 1.2 м) и старые льды в количестве от 30% ($S_{\text{толст}} \geq 30\%$) и более.

Краткосрочное прогнозирование типов ледовых условий

Как отмечалось выше, прогностическая численная модель эволюции ледяного покрова позволяет прогнозировать состояние ледяного покрова с заблаговременностью до 5 суток. Технически результат прогноза представляет собой набор матриц, где каждая матрица – это географическое распределение одного ледового параметра по площади расчетной области, а каждый элемент матрицы – это значение данного параметра в соответствующей ячейке сетки.

Общее количество матриц, генерируемых моделью на каждый момент времени, равно 24:

- 6 матриц, содержащих значения частной сплоченности льда по шести возрастным градациям;
- 6 матриц, содержащих значения толщины льда по шести возрастным градациям;
- 6 матриц, содержащих значения характерных размеров льдин по шести возрастным градациям;
- 1 матрица, содержащая значения специального идентификатора, позволяющего отличать дрейфующий лед от припая;
- 1 матрица, содержащая значения эквивалентной толщины торосов;

- 1 матрица, содержащая значения разрушенности льда;
- 2 матрицы, содержащие значения составляющих скорости дрейфа льда;
- 1 матрица, содержащая значения сжатия льда.

Отдельной матрицы для общей сплоченности льда не предусмотрено, так как общая сплоченность легко оценивается как сумма частных сплоченностей.

Имея значения частной сплоченности льда каждой возрастной градации в каждой ячейке сетки, можно оценить площадь, занимаемую любым льдом (то есть ледовитость), льдом заданной общей сплоченности или льдом заданного возраста на всей расчетной области или на некоторой ее части. Такая несложная процедура открывает возможность применить критерии типизации ледовых условий к прогностической ледовой карте и оценить ожидаемый тип ледовых условий.

Краткосрочное прогнозирование типов ледовых условий заблаговременностью 3–4 суток с использованием вышеописанной системы критериев осуществляется в ААНИИ на регулярной основе по заказу Администрации Северного морского пути (АСМП) с 2016 г.

До октября 2020 г. типы ледовых условий прогнозировались для семи крупных районов, где каждый район – это часть арктического моря:

- юго-западная часть Карского моря;
- северо-восточная часть Карского моря;
- западная часть моря Лаптевых;
- восточная часть моря Лаптевых;
- западная часть Восточно-Сибирского моря;
- восточная часть Восточно-Сибирского моря;
- юго-западная часть Чукотского моря.

В сентябре 2020 г. вышло постановление Правительства РФ №1487 «Об утверждении Правил плавания

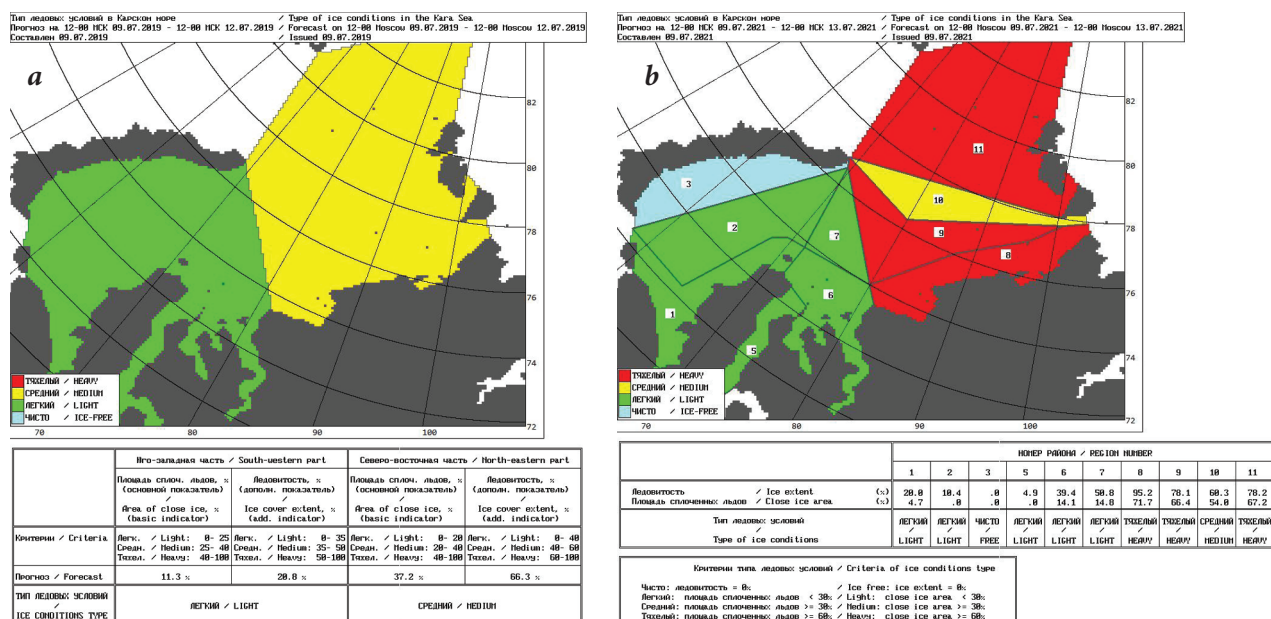


Рис. 3. Пример карт-схем с прогнозом типов ледовых условий в Карском море: а – с 09.07.2019 г. на период 09–12.07.2019 (по крупным районам); б – с 09.07.2021 г. на период 09–13.07.2021 (по малым районам).

в акватории Северного морского пути» [21]. Согласно этому документу, акватория Северного морского пути делится не на 7 крупных районов, а на 28 районов меньшего размера. Соответственно, начиная с октября 2020 г. типы ледовых условий прогнозируются по 28 районам. Несмотря на то, что тип ледовых условий прогнозируется, как и до октября 2020 г., по району в целом, без детализации локальных особенностей, использование большего количества районов позволило лучше учитывать пространственное разнообразие ледовых условий. Прогнозы передаются в АСМП в виде карт-схем с таблицей. На рисунке 3 представ-

лены примеры таких карт-схем для Карского моря с использованием крупных и малых районов.

За полтора года, прошедшие после принятия новой редакции [21] составлено и проверено несколько сотен прогнозов, обобщенные результаты которых представлены в таблицах 4 и 5.

Из таблицы 4 видно, что характерные значения оправдываемости прогнозов типов ледовых условий в основном варьируются в пределах 92–98%, а абсолютные ошибки прогнозов ключевых критериев (зимой – это площади однолетних средних и однолетних толстых льдов, летом – площадь сплоченных льдов и общая ледовитость) в среднем составляют 2–5%, что представляется очень хорошим результатом. Но это относится ко всем прогнозам, в том числе и к тем, когда условия стабильны и тип не меняется, тогда как наибольший интерес вызывают случаи смены типа.

Таблица 4. Значения ошибок прогнозов, ключевых критериев оценки типа ледовых условий, для зимнего (а) и летнего (б) периода, а также значения оправдываемости прогнозов

а) Зима

Район	Относительная площадь однолетних средних льдов, %		Относительная площадь однолетних толстых льдов, %		Оправдываемость прогноза типа, %
	Ср. арифм. ошибка	Ср. абс. ошибка	Ср. арифм. ошибка	Ср. абс. ошибка	
Карское море (районы 1-11)	-0.3	2.4	-0.2	0.7	98.2
Море Лаптевых (районы 12-17)	-1.6	2.2	0.0	0.1	98.2
В.-Сибирское море (районы 18-24)	-1.6	2.2	0.0	0.2	97.1
Чукотское море (районы 25-28)	-0.5	0.8	0.0	0.2	97.8

Таблица 4. Значения ошибок прогнозов, ключевых критериев оценки типа ледовых условий, для зимнего (а) и летнего (б) периода, а также значения оправдываемости прогнозов (окончание)

б) Лето

Район	Ледовитость, %		Относительная площадь сплоченных льдов, %		Оправдываемость прогноза типа, %
	Ср. арифм. ошибка	Ср. абс. ошибка	Ср. арифм. ошибка	Ср. абс. ошибка	
Карское море (районы 1–11)	3.3	4.4	0.5	2.6	96.6
Море Лаптевых (районы 12–17)	3.2	5.2	0.4	2.8	92.3
В.-Сибирское море (районы 18–24)	4.2	5.7	-0.6	4.2	95.5
Чукотское море (районы 25–28)	3.9	4.9	0.1	3.1	86.4

Таблица 5. Ошибки прогнозов ключевых критериев при удачных и неудачных прогнозах смены типа ледовых условий

Море	Ошибки прогноза ключевого критерия, %, и число случаев <i>N</i>	При ошибочном прогнозе смены типа		При точном прогнозе смены типа
		Ошибка «ложная тревога»	Ошибка «пропуск явления»	
Карское	Ср. арифметическая	-2.7	0.2	-0.7
	Ср. абсолютная	4.6	4.8	3.0
	<i>N</i>	3	19	34
Лаптевых	Ср. арифметическая	-0.6	4.0	-1.8
	Ср. абсолютная	3.9	4.3	3.1
	<i>N</i>	3	11	15
Восточно-Сибирское	Ср. арифметическая	2.6	-4.2	0.4
	Ср. абсолютная	5.6	5.1	1.0
	<i>N</i>	6	9	26
Чукотское	Ср. арифметическая	-2.8	2.6	1.7
	Ср. абсолютная	4.6	2.6	1.9
	<i>N</i>	4	3	7

Данные таблицы 5 показывают, что в большинстве случаев смена типа прогнозировалась успешно. Но даже и в тех случаях, когда «уловить» смену типа не удавалось, ошибка прогноза ключевых критериев была, как правило, незначительной, в основном, в пределах $\pm 2.5... \pm 5.5\%$. Это примерно соответствует общему фону ошибок прогнозов ключевых критериев, представленному в таблице 4. Иными словами, когда ледовые условия приближаются к мо-

менту смены типа, то даже незначительная ошибка прогноза ключевого критерия иногда может привести к неудачному прогнозу типа ледовых условий и, соответственно, к ошибке прогноза даты смены типа на 3–4 суток.

Долгосрочное прогнозирование типов ледовых условий

Полученные результаты по изменчивости ледовых условий арктических морей и выполненная типизация позволили не только установить критерии классификации ледовых условий для летнего и зимнего

навигационных периодов, но и разрабатывать методы прогнозов типов сложности ледовых условий с заблаговременностью до 30 суток.

При исследовании ледовых процессов используются методы корреляционного анализа для выявления различного рода связей между характеристиками состояния ледяного покрова и показателями гидрометеорологических процессов, определяющих их изменчивость. Корреляционный анализ является основой физико-статистических методов долгосрочных прогнозов различных характеристик ледовых условий в арктических морях.

Проблема поиска информативных факторов может решаться в рамках автоматизированной системы на основе использования линейных комбинаций. С помощью автоматизированной прогностической системы (АПС) «Пегас» из совокупности рядов или полей исходных гидрометеорологических элементов выбираются оптимальные показатели, на их основе рассчитываются обобщенные показатели, являющиеся линейными комбинациями от исходных данных. АПС «Пегас» успешно применяется для долгосрочного ледового прогнозирования [22].

Основным назначением АПС «Пегас» является исследование информативности различных гидрометеорологических полей, построение расчетных и прогностических моделей. Она позволяет исследовать информативность как точечных измерений (например, данные одной полярной станции), так и полей элементов, представленных в узлах сеточной области. Это особенно важно при исследовании полей атмосферного давления, так как разность давления между различными узлами сеточной области имеет вполне определенный физический смысл, характеризуя направление и интенсивность воздушных переносов.

Из стандартных статистических процедур программа позволяет:

оценивать статистическую связь коэффициентами корреляции; по заданному критерию игнорировать или учитывать аргумент; выбирать наиболее значимые аргументы; на основе элементарного дискриминантного анализа проводить обобщение всей информации и рассчитывать обобщенный показатель. АПС «Пегас» позволяет выделять наиболее информативные створы давления, определяющие формирование зимних ледовых условий.

Для прогноза появления льдов различных возрастных групп и изменения их количества в задаче долгосрочного прогноза типов ледовых условий в летний период в АПС «Пегас» в качестве исходных данных (предикторов) предлагается использовать следующие показатели:

- поля атмосферного давления предшествующего осеннего периода до месяца составления прогноза включительно;
- среднемесячное значение температуры воздуха в предшествующий месяц;
- ледовитость и площадь сплоченных льдов в районе на момент составления прогноза.

В качестве прогнозируемых элементов в АПС «Пегас» выступают показатели площади сплоченных льдов (площадь ледяного массива) и ледовитость района на прогнозируемый месяц. Анализ информативности различных привлекаемых показателей метеорологического и ледового режима показывает, что большинство из них статистически значимы и информативны. Использование этих показателей позволяет построить результирующее уравнение регрессии с коэффициентами корреляции 0.88–0.93. Прогноз составляется в конце каждого месяца летнего периода, с момента начала активного таяния и сокращения льдов в результате их разрушения – с конца июня. Заблаговременность прогноза составляет 30 суток.

Разработка долгосрочного прогноза типа ледовых условий в районах арктических морей для зимнего периода проводится в последние числа каждого месяца, начиная с октября и по май включительно. При построении прогностической схемы долгосрочного прогноза типа зимних ледовых условий используются следующие предикторы:

- тип зимы по данным долгосрочного метеорологического прогноза;
- суммы градусо-дней мороза для определения типа зим – суровый, умеренный или легкий – и даты устойчивого ледообразования на полярных станциях;
- толшины припайных льдов на полярных станциях для определения срока достижения градации однолетних тонких, средних и толстых льдов;

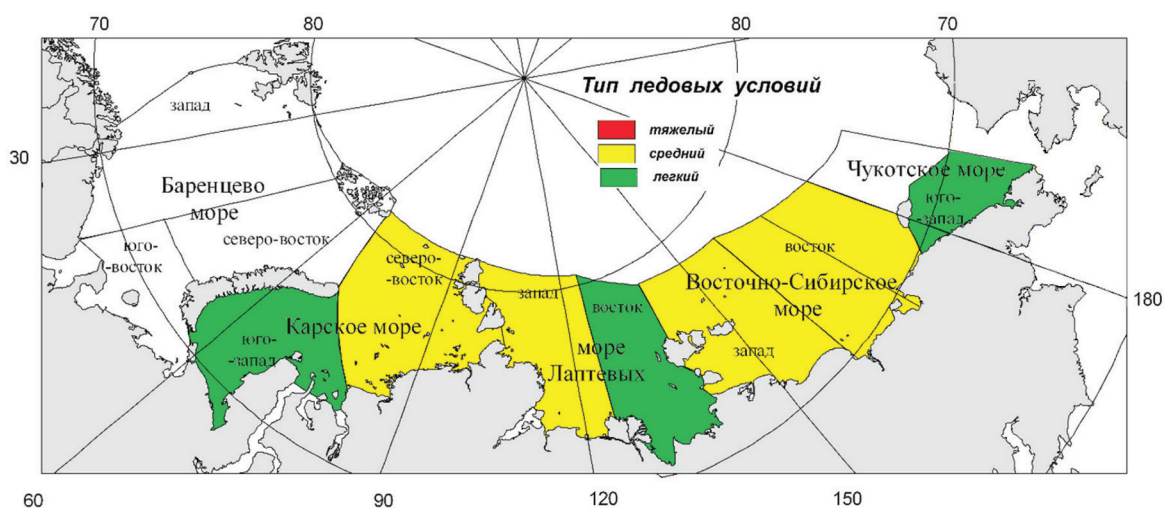


Рис. 4. Пример прогноза типов ледовых условий в семи районах российских арктических морей в летний период (на июль).

— количество льдов разного возраста по районам морей.

Прогноз формулируется в виде ожидаемого типа ледовых условий в районе моря на прогнозируемый период. В результате долгосрочного ледового прогноза для зимнего и летнего сезона прогнозируется тип ледовых условий в каждом из семи районов арктических морей. Пример прогностической карты приведен на рисунке 4.

Заключение

Исследование ледовых процессов и явлений позволяет совершенствовать динамико-термодинамическую модель эволюции ледяного покрова. Важную практическую роль имеют исследования опасных ледовых явлений, которые обуславливают быстрое изменение ледовой обстановки. Усовершенствованная модель эволюции ледяного покрова, наряду с применением современных IT-технологий, позволила разработать успешный метод краткосрочного ледового прогноза для всех российских арктических морей.

Анализ многолетней изменчивости площади ледяного покрова Северного Ледовитого океана и отдель-

но каждой акватории российских арктических морей позволяет выявить основные закономерности, выполнить типизацию ледовых прогнозов для зимнего и летнего периода и разработать эффективные методы долгосрочных ледовых прогнозов.

Разработанные долгосрочные и краткосрочные прогнозы типов ледовых условий внедрены в систему управления Северного морского пути и используются для выдачи разрешений на плавание судов в акватории СМП.

Благодарности

Статья подготовлена по результатам исследований проекта РФФИ №18-05-60109 и по результатам проектов программы «Исследование гидрометеорологических процессов в Мировом океане, морях и устьях рек России, Арктике и Антарктике» Росгидромета.

Литература

1. И.Е. Фролов, З.М. Гудкович, В.П. Карклин, Е.Г. Ковалев, В.М. Смоляницкий
Научные исследования в Арктике, в 2 тт., т. 2: Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа, РФ, Санкт-Петербург, Наука, 2007, 136 с.
2. В.Г. Смирнов, И.А. Бычкова, Н.Ю. Захваткина, Е.У. Миронов, С.В. Клячкин
Метеорология и гидрология, 2019, №11, 56.
3. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике, под ред. Е.У. Миронова, РФ, Санкт-Петербург, Изд. ААНИИ, 2010, 320 с.
4. Е.У. Миронов, С.В. Клячкин, А.В. Юлин
Метеорология и гидрология, 2019, №4, 26.
5. С.В. Клячкин, Р.Б. Гузенко, Р.И. Май, Е.Б. Саперштейн, И.А. Сергеева, С.И. Ярославцева
В Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», РФ, Санкт-Петербург, Химиздат, 2019, с. 456–460. (http://mgo-spb.ru/f/conferencia_20191.pdf).
6. A.F. Blumberg, G.L. Mellor
В Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Ser. Coastal and Estuarine Sciences, Vol. 4, Ed. N. Heaps, USA, D.C., Washington,

- AGU Publ., 1987, pp. 1–16.
DOI: 10.1029/CO004p0001.
7. **G.L. Mellor**
Users Guide for A Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model, publ. Jan. 2003, 57 pp. (https://www.researchgate.net/profile/George-Mellor-2/publication/242777179_Users_Guide_For_A_Three-Dimensional_Primitive_Equation_Numerical_Ocean_Model/links/00b49531627dd81dca000000/Users-Guide-For-A-Three-Dimensional-Primitive-Equation-Numerical-Ocean-Model.pdf?origin=publication_detail).
8. **M.G.G. Foreman**
Pac. Mar. Sci. Rep. 77-10: Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction, CA, Sidney, Inst. Ocean Sci. Publ., 1977, 58 pp. (<http://www.ccpo.odu.edu/~klinck/Reprints/PDF/foremanREP1977.pdf>).
9. **A.B. Некрасов**
Энергия океанских приливов, СССР, Ленинград, Гидрометеиздат, 1990, 288 с.
10. **A.E. Gill**
Atmosphere–Ocean Dynamics, Int. Geophys. Ser., Vol. 30, USA, CA, San Diego, Academic Press, 1982, 662 pp.
11. **A. Rosati, K. Miyakoda**
J. Phys. Oceanogr., 1988, **18**(11), 1601.
DOI: 10.1175/1520-0485(1988)018<1601:AGCMFU>2.0.CO;2.
12. **J.W. Zillman**
Study of Some Aspects of the Radiation and Heat Budgets of the Southern Hemisphere Oceans, Ser. Meteorol. study, Vol. 26, Australia, Canberra, Australian Government Publishing Service, 1972, 562 pp.
13. **А.Я. Николаева, Н.П. Шестериков**
Труды ААНИИ, 1970, **292**, 143.
14. **З.М. Гудкович, Ю.П. Дорони**
Дрейф морских льдов, РФ, Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, 2001, 112 с.
15. **И.Л. Аппель, З.М. Гудкович**
Численное моделирование и прогноз эволюции ледяного покрова арктических морей в период таяния, РФ, Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, 1992, 143 с.
16. **Д.Е. Хейсин, В.О. Ивченко**
Океанология, 1975, **15**(5), 803.
17. **В.П. Карклин, А.В. Юлин, И.Д. Карелин, В.В. Иванов**
Труды ААНИИ, 2001, **443**, 5.
18. **AARI WDC Sea-Ice**. (<http://wdc.aari.ru>).
19. **O.M. Johannesen, V.Yu. Alexandrov, I.E. Frolov, S. Sandven, L.H. Pettersson, L.P. Bobylev, K. Kloster, V.G. Smirnov, E.U. Mironov, N.G. Babich**
Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route: Studies and Applications, Ser. Springer Praxis Books, UK, Chichester, Springer & Praxis Publ., 2007, 472 pp.
DOI: 10.1007/978-3-540-48840-8.
20. **В.П. Карклин, С.В. Хотченков, А.В. Юлин**
В Информационный сборник №44 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов», под ред. А.А. Алексеевой, РФ, Москва, Обнинск, ИГ–СОЦИН, 2017, с. 113–125.
(<http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb44/karlin.pdf>).
21. *Правила плавания в акватории Северного морского пути, утв. ПП РФ №1487 от 18.09.2020*, В Собр. законодательства Российской Федерации, РФ, Москва, Изд. Юридическая литература, 2020, №39, ст. 6064.
(<http://ivo.garant.ru/#/document/74664152/paragraph/1/0>).
22. **Е.Г. Ковалев, А.В. Юлин**
Труды ААНИИ, 1998, **438**, 73.

English |||

Studies of Ice Processes in the Arctic for the Developing the Forecasting Ice Conditions Models and Methods Necessary for Navigation Support in the North Sea Route Area*

Yevgeny U. Mironov

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str.,
St. Petersburg, 199397, Russia
mir@aari.ru

Sergey V. Klyachkin

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str.,
St. Petersburg, 199397, Russia
sykl@aari.ru

Aleksandr V. Yulin

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str.,
St. Petersburg, 199397, Russia
icefor@aari.ru

Ruslan I. May

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str.,
St. Petersburg, 199397, Russia
may@aari.ru

Evgeniya A. Pavlova

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str.,
St. Petersburg, 199397, Russia
Pavlova@aari.ru

Abstract

The thermodynamic and dynamic processes causing the ice cover formation, growth and dynamics are considered. The significance of studying the dangerous ice phenomena like intensive ice drift, ice pressure and ice ridge formation is shown. The brief description of ice cover evolution model used for the short-range ice forecasts is presented. The multi-year variability of ice cover extent in the Arctic Ocean as a whole and in the Arctic seas in particular is analyzed. The basic principles of dividing the ice conditions into types both in summer and winter are presented. The methods of short-range (up to 5 days) and long-range (up to 30 days) ice forecasts are briefly described. The practical realization of forecasting the type of ice conditions used by the North Sea Route Administration for providing the permissions for navigation in the NSR area is demonstrated.

Keywords: sea ice, ice phenomena, forecast methods, the Arctic seas.

**The work was financially supported by RFBR (project 18-05-60109.)*

Images & Tables

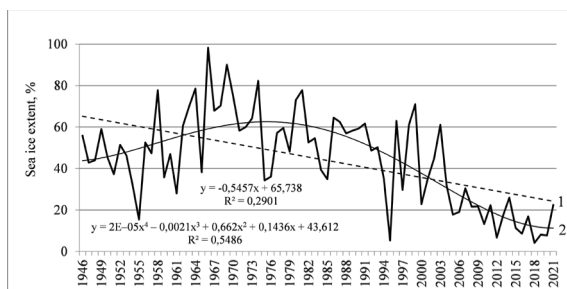


Fig. 1. Multiyear variability of ice cover extent in the Kara Sea in August from 1946 to 2021. Trends: 1 – linear, 2 – polynomial.

Table 1. Basic statistical characteristics of the sea ice extent variability in the Kara Sea in summer during various periods, %

Parameters	Month, 10-day period								
	VII-1	VII-2	VII-3	VIII-1	VIII-2	VIII-3	IX-1	IX-2	IX-3
“Cold” period 1959–1989									
Average value	89	85	77	66	54	46	37	33	32
“Warm” period 1990–2020									
Average value	73	64	49	39	30	23	20	18	17
Difference*	15	21	29	26	23	22	17	15	15

* Difference between the average values in the “cold” and “warm” periods.

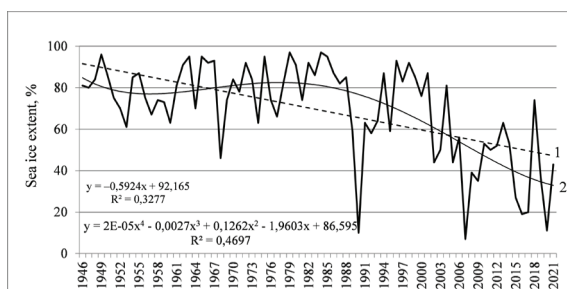


Fig. 2. Multiyear time-progress of ice cover extent in the East-Siberian Sea in August from 1946 to 2018. Trends: 1 – linear, 2 – polynomial.

Table 2. Basic statistical characteristics of the sea ice extent variability in the East-Siberian Sea in summer during various periods

Parameters	Month, 10-day period								
	VII-1	VII-2	VII-3	VIII-1	VIII-2	VIII-3	IX-1	IX-2	IX-3
“Cold” period 1959–1989									
Average value	96	95	92	88	82	77	73	70	69
“Warm” period 1990–2020									
Average value	93	89	82	66	57	46	38	33	31
Difference*	3	6	10	22	25	31	35	38	38

* Difference between the average values in the “cold” and “warm” periods.

Table 3. Number of cases (N) and frequency of occurrence (P) of various types of ice conditions in the Russian Arctic seas during the period of 2000–2020

Type of ice conditions	Seas							
	Kara Sea		Laptev Sea		East-Siberian Sea		Chukchi Sea	
	N	P, %	N	P, %	N	P, %	N	P, %
Heavy	1	5	1	5	1	5	1	5
Light	4	20	9	45	10	50	13	65
Medium	15	75	10	50	9	45	6	30

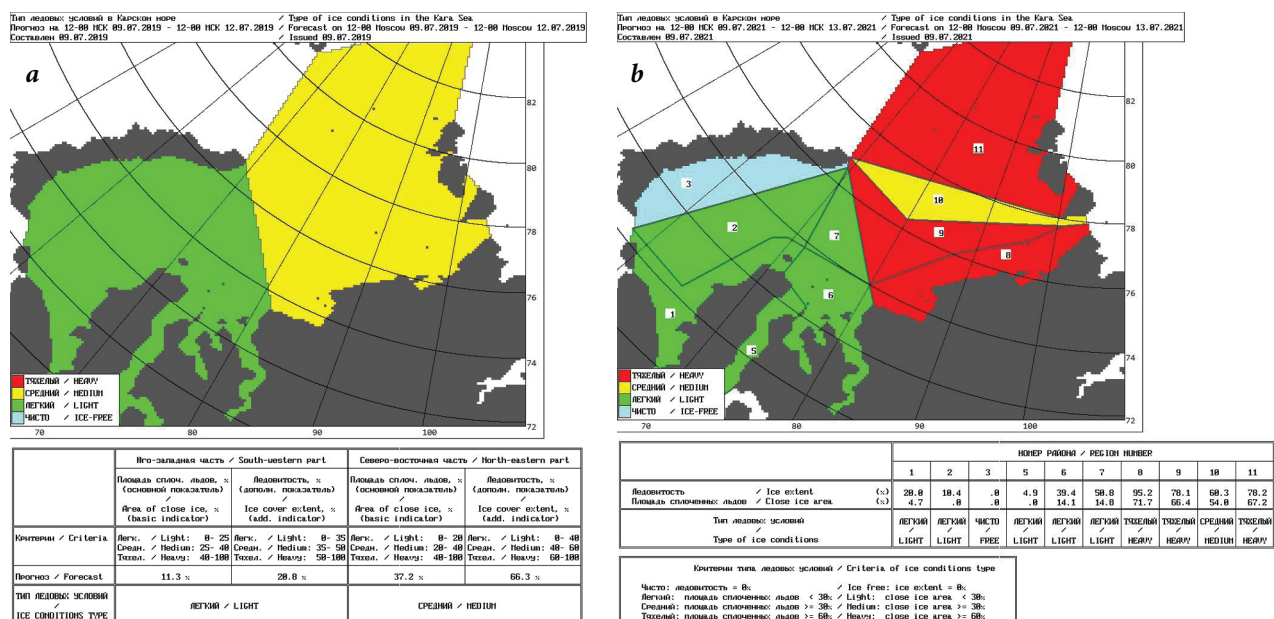


Fig. 3. Example of the diagrams containing the forecast of ice condition types in the Kara Sea: a – issued on 09.06.2019 for the period 09-12.06.2019 (for large areas); b – issued on 09.07.2021 for the period 09-13.07.2021 (for small areas).

Table 4. Values of forecast errors, key criteria for assessing the type of ice conditions, for the winter (a) and summer (b) periods, as well as the values of the accuracy of the ice condition forecasts

a – Winter

Region	Relative area of first-year medium-thick ice, %		Relative area of first-year thick ice, %		Justification of the ice condition forecast, %
	Mean error	Mean absolute error	Mean error	Mean absolute error	
Kara Sea (areas 1-11)	-0.3	2.4	-0.2	0.7	98.2
Laptev Sea (areas 12-17)	-1.6	2.2	0.0	0.1	98.2
East-Siberian Sea (areas 18-24)	-1.6	2.2	0.0	0.2	97.1
Chukchi Sea (areas 25-28)	-0.5	0.8	0.0	0.2	97.8

b – Summer

Region	Ice coverage, %		Relative area of packed ice, %		Justification of the ice condition forecast, %
	Mean error	Mean absolute error	Mean error	Mean absolute error	
Kara Sea (areas 1-11)	3.3	4.4	0.5	2.6	96.6
Laptev Sea (areas 12-17)	3.2	5.2	0.4	2.8	92.3
East-Siberian Sea (areas 18-24)	4.2	5.7	-0.6	4.2	95.5
Chukchi Sea (areas 25-28)	3.9	4.9	0.1	3.1	86.4

Table 5. Forecast errors of key criteria for successful and unsuccessful forecasts of the ice conditions type changes

Region	Key criteria forecast error, %, and number of cases N	Erroneous forecast of type change		Accurate forecast of type change
		False alarm error	"Missing event" error	
Kara Sea	Mean error	-2.7	0.2	-0.7
	Mean absolute error	4.6	4.8	3.0
	N	3	19	34
Laptev Sea	Mean error	-0.6	4.0	-1.8
	Mean absolute error	3.9	4.3	3.1
	N	3	11	15
East-Siberian Sea	Mean error	2.6	-4.2	0.4
	Mean absolute error	5.6	5.1	1.0
	N	6	9	26
Chukchi Sea	Mean error	-2.8	2.6	1.7
	Mean absolute error	4.6	2.6	1.9
	N	4	3	7

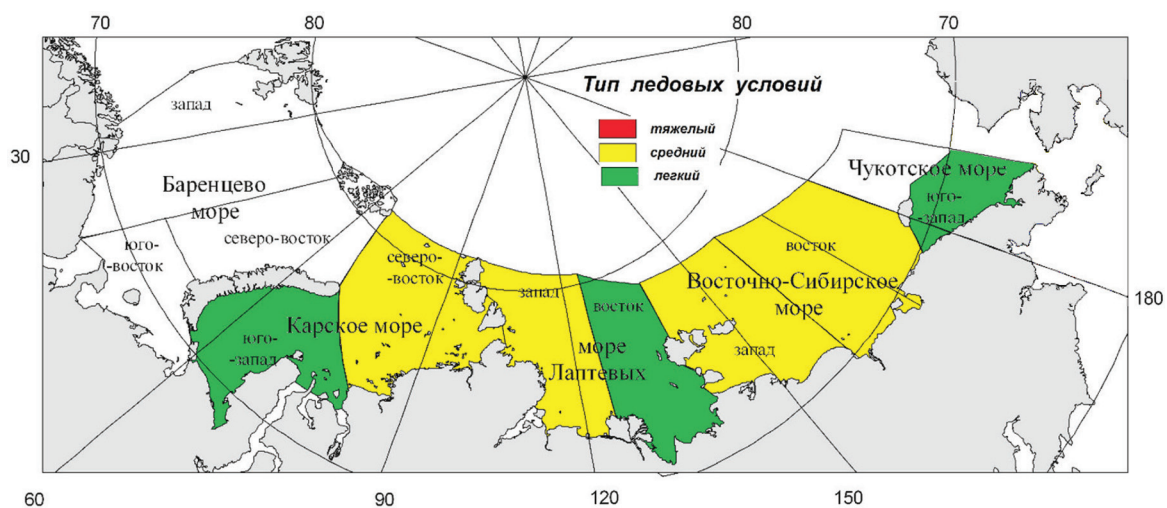


Fig. 4. Example of ice conditions type forecast in 7 regions of the Russian Arctic seas in summer (July).

References

1. I.E. Frolov, Z.M. Gudkovich, V.P. Karklin, E.G. Kovalev, V.M. Smolyanitsky
Nauchnye issledovaniya v Arktike, v 2 tt., t. 2: Klimaticheskie izmeneniya ledyanogo pokrova morey Evraziyskogo shelfa [Scientific Studies in the Arctic in 2 Vols, Vol. 2: Climatic Changes of the Ice Cover of the Eurasian Shelf Seas], RF, Snt Petersburg, Nauka Publ., 2007, 136 pp. (in Russian).
2. V.G. Smirnov, I.A. Bychkova, N.Yu. Zakhvatkina, E.U. Mironov, S.V. Klyachkin
Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology], 2019, №11, 56 (in Russian).
3. *Opasnyye ledovyye yavleniya dlya sudokhodstva v Arktike* [Ice Phenomena Threatening Arctic Shipping], Ed. E.U. Mironov, RF, Snt Petersburg, AARI Publ., 2010, 320 pp. (in Russian).
4. Ye.U. Mironov, S.V. Klyachkin, A.V. Yulin
Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology], 2019, №4, 26 (in Russian).
5. S.V. Klyachkin, R.B. Guzenko, R.I. May, E.B. Sapershtein, I.A. Sergeeva, S.I. Yaroslavl'tseva
In Proc. 3rd Russian National Conference "Hydrometeorology and Ecology: Scientific and Educational Achievements and Perspectives", RF, Snt Petersburg, Khimizdat Publ., 2019, pp. 456–460 (in Russian). (http://mgo-spb.ru/f/conferencia_20191.pdf).
6. A.F. Blumberg, G.L. Mellor
In *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, Ser. Coastal and Estuarine Sciences, Vol. 4, Ed. N. Heaps, USA, D.C., Washington, AGU Publ., 1987, pp. 1–16.
DOI: 10.1029/CO004p0001.
7. G.L. Mellor
Users Guide for A Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model, publ. Jan. 2003, 57 pp. (https://www.researchgate.net/profile/George-Mellor-2/publication/242777179_Users_Guide_For_A_Three-Dimensional_Primitive_Equation_Numerical_Ocean_Model/links/00b49531627dd81dca000000/Users-Guide-For-A-Three-Dimensional-Primitive-Equation-Numerical-Ocean-Model.pdf?origin=publication_detail).
8. M.G.G. Foreman
Pac. Mar. Sci. Rep. 77-10: Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction, CA, Sidney, Inst. Ocean Sci. Publ., 1977, 58 pp. (<http://www.ccpo.odu.edu/~klinck/Reprints/PDF/foremanREP1977.pdf>).
9. A.V. Nekrasov
Energia okeanskikh prilivov [Energy of the Ocean Tides], USSR, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1990, 288 pp. (in Russian).
10. A.E. Gill
Atmosphere–Ocean Dynamics, Int. Geophys. Ser., Vol. 30, USA, CA, San Diego, Academic Press, 1982, 662 pp.
11. A. Rosati, K. Miyakoda
J. Phys. Oceanogr., 1988, 18(11), 1601.
DOI: 10.1175/1520-0485(1988)018<1601:AGCMFU>2.0.CO;2.
12. J.W. Zillman
Study of Some Aspects of the Radiation and Heat Budgets of the Southern Hemisphere Oceans, Ser. Meteorol. study, Vol. 26, Australia, Canberra, Australian Government Publishing Service, 1972, 562 pp.
13. A.Ya. Nikolayeva, N.P. Shesterikov
Trudy AANII [Proc. AARI J.], 1970, 292, 143 (in Russian).
14. Z.M. Gudkovich, Yu.P. Doronin
Dreyf morskikh ldov [Sea Ice Drift], RF, Snt Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001, 112 pp. (in Russian).
15. I.L. Appel, Z.M. Gudkovich
Chislennoe modelirovanie i prognoz evolyutsii ledyanogo pokrova arkticheskikh morey v period tayanii [Numerical Modeling and Forecasting of Evolution of the Arctic Seas Ice Cover in the Melting Period], RF, Snt Petersburg, Gidrometeoizdat, 1992, 143 pp. (in Russian).
16. D.E. Kheysin, V.O. Ivchenko
Oceanography [Okeanologia], 1975, 15(5), 803 (in Russian).
17. V.P. Karklin, A.V. Yulin, I.D. Karelin, V.V. Ivanov
Trudy AANII [Proc. AARI J.], 2001, 443, 5 (in Russian).
18. AARI WDC Sea-Ice. (<http://wdc.aari.ru>).
19. O.M. Johannesen, V.Yu. Alexandrov, I.E. Frolov, S. Sandven, L.H. Pettersson, L.P. Bobylev, K. Kloster, V.G. Smirnov, E.U. Mironov, N.G. Babich
Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route: Studies and Applications, Ser. Springer Praxis Books, UK, Chichester, Springer & Praxis Publ., 2007, 472 pp.
DOI: 10.1007/978-3-540-48840-8.
20. V.P. Karklin, S.V. Khotchenkov, A.V. Yulin
In *Informatsionny sbornik №44 «Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov»* [Information collection No. 44 "Results of Testing New and Improved Technologies, Models and Methods of Hydrometeorological Forecasts"], Ed. A.A. Alekseeva, RF, Moscow, Obninsk, IG-SOTSIN, 2017, c. 113–125 (in Russian). (<http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb44/karlin.pdf>).
21. *Pravila plavaniya v akvatorii Severnogo morskogo puti* [On Approval of the Rules for Navigation in the Waters of the Northern Sea Route], Appr. Orders Govern. Russia No. 1487, 09/18/2020, In Collection of Legislation of the Russian Federation, RF, Moscow, Yuridicheskaya Literatura Publ. House, 2020, No. 39, Art. 6064 (in Russian). (<http://ivo.garant.ru/#/document/74664152/paragraph/1:0>).
22. E.G. Kovalev, A.V. Yulin
Trudy AANII [Proc. AARI J.], 1998, 438, 73 (in Russian).