

УДК 551.326.7

РАСЧЁТ ПРЕОБЛАДАЮЩЕЙ ОРИЕНТАЦИИ РАЗРЫВОВ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ ПО ДАННЫМ ДРЕЙФА ЛЬДА

© 2023 г. Л. Н. Дымент^{1,*}, А. А. Ершова¹, В. С. Порубаев¹, А. А. Чиркова¹

¹Арктический и антарктический НИИ, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: ldyment@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.04.2023 г.

После доработки 25.05.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Изложены основы алгоритма, позволяющего определить по последовательности полей приземного атмосферного давления за предшествующий период дату возникновения дрейфа льда, приведшего к деформациям в ледяном покрове и образованию существующей системы разрывов в море Лаптевых. Приведены результаты оправдываемости расчётной ориентации разрывов, полученной по данным фактического дрейфа льда на основе разработанного алгоритма.

Ключевые слова: нарушения сплошности льда, направление разрывов, интенсивность воздушных потоков, деформация ледяного покрова, спутниковые снимки

DOI: 10.31857/S2076673423030031, **EDN:** PLYIJW

ВВЕДЕНИЕ

Основные стратегии социально-экономического развития Российской Федерации включают в себя реализацию круглогодичной навигации по Северному морскому пути (далее – СМП), которая является системным условием развития Арктического региона. Для обеспечения регулярного транспортного коридора в сложных ледовых условиях Арктики помимо увеличения и модернизации ледокольного флота требуется совершенствование существующих, и разработка новых методов гидрометеорологического обеспечения, способных обеспечить эффективное и безопасное судоходство.

Морской ледяной покров характеризуется пространственной и временной неоднородностью, предоставляя судоводителю возможность выбора наиболее лёгкого из имеющихся вариантов маршрута судна. Одной из важнейших для навигации характеристик ледяного покрова являются разрывы – нарушения сплошности льда, образующиеся в результате динамических процессов. Разрывы представляют собой протяжённые участки в сплочённом льду как с открытой водой, так и покрытые ниласом, молодым льдом или заполненные ледяной кашей (Номенклатура..., 2014). Ширина разрывов изменяется от нескольких метров до нескольких сотен метров, а протяжённость может достигать нескольких тысяч километров. Таким образом, само определение разры-

вов уже указывает на потенциал их использования в качестве маршрутов более лёгкого плавания в ледовых условиях. На основании опыта гидрометеорологического обеспечения высокоширотных плаваний и транзитных рейсов по СМП было установлено, что эффективность использования разрывов зависит от их ориентации относительно генерального курса судна (Фролов, 1997). Наиболее результативным оказывается использование систем ориентированных попутных разрывов (Фролов, Клячкин, 2001). Таким образом, разработка метода прогноза характеристик разрывов в ледяном покрове арктических морей – актуальная задача, при этом особенно востребованы сведения о предполагаемой преобладающей ориентации разрывов.

Основными причинами возникновения деформаций льда и, как следствие, образования или закрытия разрывов, являются неравномерности в поле дрейфа льда, возникающие из-за пространственно-временной изменчивости действующих на ледяной покров внешних сил, таких как ветер, приливные явления (Назирова, 1982) и течения. В прибрежных районах на дрейф льда также оказывают влияние особенности береговой черты и рельефа дна (Смирнов, 1996; Клячкин и др., 2015). При этом основной вклад в дрейф льда вносит ветровая компонента (Доронин, Хейсин, 1975; Горбунов и др., 1986; Легеньков, 1988; Гудкович, Доронин, 2001). Поскольку скорость и на-

правление ветра тесно связаны с барическим градиентом, дрейф льда определяется распределением атмосферного давления в приземном слое, причём резкое изменение барического поля может привести к достаточно быстрой перестройке системы разрывов. Если у судоводителя имеется возможность получения оперативной информации о текущей ледовой обстановке непосредственно в районе плавания, выбор оптимального маршрута следования принимается на основании фактических данных. Для успешного планирования морских операций существует потребность в краткосрочных прогнозах ориентации разрывов с заблаговременностью до 5 суток.

В настоящее время в Арктическом и Антарктическом институте разрабатывается автоматизированный метод краткосрочного прогноза преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых, в основе которого лежит метод аналогов. В качестве характеристики преобладающего направления разрывов используется их модальная ориентация. Особенности расчёта модальной ориентации разрывов подробно описаны в (Горбунов и др., 2014). Каждый комплексный аналог представляет собой совокупность ретроспективных полей приземного атмосферного давления, дрейфа льда, дивергенции скорости дрейфа, модальной ориентации и удельной длины разрывов. Суть аналогового метода прогноза заключается в том, чтобы подобрать для рассматриваемой акватории из ретроспективного ряда такое поле атмосферного давления, которое имеет максимальное сходство с прогностическим полем. В этом случае предполагается, что похожие поля формируют разрывы с близкими значениями своих характеристик, на основании чего составляется прогноз. Высокая оправдываемость краткосрочных прогнозов полей приземного атмосферного давления, которые лежат в основе подбора аналога, предполагает, что количество неудовлетворительных прогнозов характеристик разрывов по причине несоответствия прогностического поля давления реальному будет минимальным. Обоснованность такого подхода подтверждают предыдущие исследования и разработанные ранее на их основе методы среднесрочного прогноза преобладающей ориентации разрывов в Арктическом бассейне (Горбунов и др., 2008) и в Карском море (Горбунов и др., 2001). Преимущество аналогового метода заключается в том, что он основан на фактических данных о разрывах, и таким образом уже учитывает не только действие циркуляции атмосферы, но и влияние береговой черты, островов и других факторов, определяющих дрейф.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При разработке метода прогноза преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых для получения фактических данных о разрывах используются снимки ИСЗ SuomiNPP разрешением 375 м инфракрасного диапазона (11 мкм) с полосой обзора 3000 км. Главным преимуществом этих снимков является единовременный охват всей акватории моря Лаптевых. Основным недостатком снимков выбранного диапазона — ограничение видимости при наличии облачности, что приводит к невозможности дешифрирования разрывов и, как следствие, к пробелам в фактических данных. Радиолокационные снимки, лишённые этого недостатка, имеют недостаточно большой пространственный охват по сравнению с площадью моря. Конструирование мозаики из нескольких радиолокационных снимков не устраняет проблему, так как за промежуток времени между последовательными снимками системы разрывов могут существенно измениться. Кроме того, радиолокационный сигнал, проникая сквозь облачность, реагирует на шероховатость поверхности, и поэтому покрытые молодым льдом разрывы трудно идентифицируются на фоне более возрастного ровного льда.

Таким образом, при разработке метода прогноза ориентации разрывов возникает необходимость в восстановлении полной картины положения нарушений сплошности ледяного покрова на акватории моря путём дополнения фактических данных расчётными.

В результате неравномерности поля дрейфа льда в ледяном покрове возникают деформации. Сжатие и растяжение в каждой точке ледяного покрова характеризует тензор деформации. Известно, что в любой точке плоскости можно провести две взаимно перпендикулярные оси, вдоль которых из двух составляющих деформации одна будет максимальной, а вторая минимальной. Такие оси (ξ , η) называются главными осями деформации, а составляющие скорости деформаций вдоль главных осей — главными скоростями деформаций.

Для наглядного представления скорости деформации используют эллипс скорости деформации. Направление большой оси эллипса соответствует максимальному растяжению (или минимальному сжатию), малая ось — минимальному растяжению (максимальному сжатию).

В работе (Аппель, Гудкович, 1992) приведена формула расчёта направления относительно оси

абсцисс большой оси эллипса деформаций в дрейфующем льду:

$$\varphi_{\xi} = \arctg \frac{\varepsilon_{\xi} - \varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xy}}, \quad (1)$$

здесь ε_{xx} , ε_{xy} — компоненты тензора скоростей деформации:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yx} = \frac{\partial v}{\partial x}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y},$$

где u , v — компоненты вектора скорости дрейфа льда \vec{W} вдоль декартовых осей координат. Тензор скоростей деформации ледяного покрова считается симметричным, т.е. $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}$. ε_{ξ} — составляющая скорости линейных деформаций вдоль большей оси эллипса деформации:

$$\varepsilon_{\xi} = \frac{1}{2}(\operatorname{div} \vec{W} + \gamma_{\max}). \quad (2)$$

В формуле (2) дивергенция скорости дрейфа льда $\operatorname{div} \vec{W} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}$, а суммарная деформация $\gamma_{\max} = \sqrt{Q^2 + \gamma^2}$, где линейная деформация $Q = \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}$, а угловая деформация $\gamma = \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yx}$.

Растяжение ледяного покрова приводит к образованию в нём разрывов, которые преимущественно ориентированы перпендикулярно большей оси эллипса деформации и соответственно параллельно его малой оси (Hibler, 1973). Это означает, что преобладающее направление разрывов примерно совпадает с направлением оси сжатия.

$$\varphi_{\eta} = \varphi_{\xi} + 90^{\circ}. \quad (3)$$

Сопоставление значений ориентации малой оси эллипса деформации ледяного покрова, полученных по формулам (1–3), и модальной ориентации разрывов, рассчитанной по фактическим данным, проводилось в Арктическом бассейне (Лосев, Горбунов, 1998). Авторы использовали разрывы, дешифрированные по снимкам ИСЗ малого разрешения. Приведённые в работе результаты свидетельствуют о достаточно высокой оправданности (70%) расчётных значений преобладающего направления разрывов при допуске $\pm 45^{\circ}$, т.е. расчётное значение считалось верным, если оно отличалось от фактической модальной ориентации разрывов не более чем на 45° . Для моря Лаптевых подобные исследования не проводились.

В качестве фактических значений модальной ориентации разрывов в настоящей работе использовались результаты расчёта по данным о разрывах в море Лаптевых за ледовые периоды 2016–2021 гг. Поскольку в настоящее время методы автоматической идентификации разрывов на снимках ИСЗ видимого и ИК-диапазонов

не являются достаточно надёжными, дешифрирование и оцифровка снимков ИСЗ для данной работы проводилась экспертом вручную при помощи средств ГИС. Для проведения расчётов модальной ориентации разрывов акватория моря Лаптевых была разбита на 64 квадрата 100×100 км, при этом из анализа была исключена зона, в которой большую часть ледового сезона расположен припай. Выбор размера квадрата обусловлен представлением о разрывах как о протяжённых макрообъектах, в связи с чем уменьшение размера квадрата увеличивает вероятность отсутствия в нём фактических разрывов, что может привести к появлению на исследуемой акватории большого количества квадратов, не обеспеченных фактическими данными. Квадрат сетки считался обеспеченным исходными данными о разрывах, если суммарная протяжённость разрывов в нём превышала 100 км. В противном случае такой квадрат исключался из расчёта, так как предполагалось, что полученные значения модальной ориентации разрывов в нём не будут достоверны.

Согласно (Наставление..., 2011) при прогнозе характеристик ледовых объектов на период до 5 суток допустимая ошибка прогностического значения должна составлять 0.674 от его среднеквадратического отклонения (σ). Проведённые расчёты модальной ориентации разрывов в море Лаптевых за период с октября по май 2016–2021 гг. выявили существенную изменчивость этой характеристики. Средняя за ледовый цикл величина σ модальной ориентации разрывов составляет 44° и в различные сезоны изменяется незначительно, не более чем на 3° . Таким образом, допустимая ошибка расчётного преобладающего направления разрывов не должна превышать 30° . В работе (Фролов, Клячкин, 2001) указывается, что в судоходстве в основном используются разрывы, ориентация которых отклоняется от генерального курса судна не более чем на 30° . Исходя из этих соображений при проверке оправданности расчётов преобладающего направления разрывов в море Лаптевых в качестве допустимого отклонения была принята величина 30° .

Размерность сетки для осреднения фактических данных характеристик разрывов обусловила выбор источника данных полей дрейфа для расчётных значений преобладающей ориентации разрывов. Существует несколько массивов данных дрейфа льда, предоставляемых разными организациями и находящимися в свободном доступе (CERSAT/Ifremer, NSDIC, OSI SAF). В качестве исходных данных для нашего исследования были выбраны данные архива OSI SAF Европейской организации спутниковой метеорологии EUROMETSAT (Low Resolution..., 2023). Данные OSI SAF представляют собой векторы

Таблица 1. Оправдываемость соответствия расчётной преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых фактическим значениям при определении деформации ледяного покрова по данным дрейфа за дату фиксирования разрывов и в предшествующие дни, %

Статистические показатели	Количество дней между датой снимка ИСЗ и датой данных дрейфа льда, использованных при расчёте преобладающей ориентации разрывов				
	0	1	2	3	0–3
Минимальная	24.2	34.1	16.0	16.0	46.7
Максимальная	87.5	91.3	89.6	86.8	91.3
Средняя	58.3	63.9	60.1	55.6	70.4
Стандартное отклонение	13.2	11.2	11.6	13.8	9.1
Повторяемость случаев, когда расчёт по данным дрейфа за эту дату приводил к наилучшему результату	27.8	33.5	20.3	18.4	100

скорости дрейфа льда в Северном Ледовитом океане, определяемые по последовательным спутниковым снимкам на протяжении 48 часов и интерполированные в узлы регулярной сетки с шагом 62.5 км, что сопоставимо с размерностью сетки, используемой нами при пространственном осреднении фактических данных о разрывах. Для сравнения, массив данных Французского научно-исследовательского института по эксплуатации морских ресурсов Ifremer содержит векторы дрейфа льда с временным разрешением 1, 2 и 3 суток в сетке 31.25×31.25 км; данные Национального центра данных по исследованию снега и льда NSIDC включают векторы дрейфа льда с посуточным осреднением в сетке с ячейкой 25 км. Более высокое пространственное разрешение данных этих массивов позволяет фиксировать небольшие изменения направления дрейфа льда, однако для решения задачи расчёта преобладающей ориентации разрывов по квадратам сетки 100×100 км этого не требуется. Кроме того, интерполяция исходных данных в узлы сетки с более высоким разрешением вносит дополнительные погрешности.

Значения дрейфа льда OSI SAF в море Лаптевых за выбранный период изучения интерполировались в узлы, соответствующие центрам квадратов сетки 100×100 км. По полученным значениям для каждого квадрата рассчитывались значения дивергенции скорости дрейфа, составляющие скорости деформации ледяного покрова и ориентация осей эллипса деформации, входящие в формулы (1) и (3).

Значения дрейфа льда OSI SAF – результат осреднения двухсуточного периода, отсчитываемого от 12:00 UTC. Снимки ИСЗ SuomiNPP, которые служили источником данных о разрывах, фиксируют море Лаптевых в период между 19 и 21 часами (UTC). В связи с этим в настоящем исследовании было принято, что существующим за конкретную дату разрывам соответствуют данные дрейфа за предшествующую дату. Например, информация о разрывах, полученная со снимка ИСЗ 6 марта в 19:00, ставилась в соответствие со значениями дрейфа льда за 5 марта, которые являются результатом осреднения за период с 12:00 часов 5 марта по 12:00 часов 7 марта.

В работе отобрано 200 оцифрованных снимков ИСЗ; на каждом из них данными о разрывах было обеспечено не менее трети от общего количества квадратов сетки моря Лаптевых. Суммарное число квадратов, обеспеченных данными, составило 6900.

Проведённое сопоставление полученных результатов расчёта модальной ориентации разрывов и малой оси эллипса деформации ледяного покрова выявило недостаточно высокое их совпадение. При выбранном допуске в 30° соответствии наблюдалось лишь в 58% случаев. Было проведено аналогичное сопоставление при расчёте малой оси эллипса деформации по данным дрейфа за три предшествующих дня. Результаты представлены в табл. 1. Последний столбец таблицы демонстрирует лучшие из возможных значений статистических показателей. При их определении для каждого из двухсот случаев выбирались максимальное из четырёх значений

оправдаваемости, рассчитанных по данным дрейфа за дату фиксирования разрывов и три предшествующих дня.

Наилучшее соответствие расчётной ориентации разрывов фактическим данным достигается в случае, когда для расчёта используются значения дрейфа “вчерашнего” дня, т.е. дата фиксации разрывов на снимке ИСЗ совпадает с датой окончания двухсуточного периода осреднения данных дрейфа льда. Это можно объяснить инерционностью ледовых процессов. Однако и в этом случае число квадратов с близкими значениями фактической и расчётной преобладающей ориентации разрывов не достигает 64% от общего их числа. Из двухсот снимков ИСЗ, послуживших исходными данными о разрывах, результаты расчётов по значениям дрейфа за “вчерашний” день привели к наилучшему совпадению только в трети от общего числа случаев (см. табл. 1). Иногда наилучшее совпадение достигалось при использовании данных дрейфа за более ранние дни, а расчёт по “вчерашним” данным приводил к совершенно неудовлетворительным результатам. Очевидно, что в каждом конкретном случае требуется анализ изменчивости интенсивности и направления дрейфа льда в предшествующий период для выявления дня, в который вероятнее всего произошло образование разрывов.

Поскольку в период до пяти суток основной вклад в формирование поля дрейфа льда вносит ветровая компонента, изменение поля ветра будет вызывать изменение дрейфа льда, приводящее к деформации ледяного покрова. При этом чем интенсивнее воздушные потоки, тем более значимы будут изменения, возникающие в поле дрейфа льда. Цель данной работы — разработка алгоритма, позволяющего по последовательности полей приземного атмосферного давления за предшествующий период определить дату возникновения значимых деформаций в ледяном покрове, приведших к образованию существующей на данный момент системы разрывов. Поле дрейфа льда за эту дату будет оптимальным для вычисления расчётной преобладающей ориентации разрывов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

По данным разрывов каждого дешифрованного снимка ИСЗ было рассчитано поле модальной ориентации разрывов. Наибольший интерес представляли сведения о разрывах за несколько последовательных дней. Установлено, что система разрывов в море Лаптевых может сохраняться практически неизменной на протяжении нескольких суток, а затем происходит её перестройка. Сопоставление каждого поля модальной ориентации разрывов с полями приземного атмо-

сферного давления за соответствующие дни показало, что изменение существующей системы разрывов в море Лаптевых происходило только в случае достаточно интенсивных воздушных потоков, возникающих при значительных величинах градиента в поле атмосферного давления. Если на протяжении нескольких дней отмечалось малоградиентное поле давления, разрывы не меняли своей ориентации в пространстве. Был отмечен случай, когда сложившаяся система разрывов просуществовала 7 дней (1–7 марта 2018 г.). Если же, напротив, в течение двух–трёх суток направление воздушных потоков ежедневно существенно менялось, что происходит при прохождении над морем интенсивного циклона, то ориентация разрывов также изменялась практически на всей акватории.

Для автоматического определения даты возникновения поля атмосферного давления, приводящего к изменению существующей системы разрывов, требовалось иметь некоторую количественную характеристику его интенсивности, а также определить её пороговое значение, при котором возникающие воздушные потоки способны воздействовать на изменение векторов скорости дрейфа льда. В качестве такой характеристики было принято среднее изменение атмосферного давления над акваторией моря, отнесённое на 100 км.

Определение среднего изменения атмосферного давления над акваторией моря (G) проводилось следующим образом. Рассчитывались абсолютные значения разностей атмосферного давления в двух соседних узлах географической сетки с шагом 1° по широте и 2° по долготе. При этом оба узла находились в пределах акватории моря Лаптевых. Каждая разность была отнесена к расстоянию между соответствующими узлами. Изменение атмосферного давления определялось отдельно в широтном и меридиональном направлениях, поскольку получаемое количество рассчитываемых разностей было разным и составляло 142 значения по широте (n) и 127 значений по долготе (m). Среднее значение из полученных величин представляло собой среднее изменение атмосферного давления на 1 км. В формуле (4) эта величина умножена на 100 для получения визуально более удобного порядка значимых цифр. Размерность получаемой величины G гПа/км $\times 10^2$.

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{|p_i - p_{i+1}|}{d_i}}{n} + \frac{\sum_{j=1}^m \frac{|p_j - p_{j+1}|}{d_j}}{m} \right) \times 100, \quad (4)$$

Таблица 2. Распределение по группам данных о сочетании типов интенсивности воздушных потоков в течение двух суток в зимний и весенний периоды 2016–2021 гг. в море Лаптевых

Номер группы	Интенсивность воздушных потоков		Число случаев		Повторяемость, %	
	текущий день	предыдущий день	весь период	выборка	весь период	выборка
1	средняя	средняя	334	56	26.2	28
2	низкая	низкая	259	37	20.3	18.5
3	средняя	низкая	161	26	12.6	13
4	низкая	средняя	158	24	12.4	12
5	высокая	высокая	118	22	9.3	11
6	высокая	средняя	108	14	8.5	7
7	средняя	высокая	106	18	8.3	9
8	низкая	высокая	15	2	1.2	1
9	высокая	низкая	15	1	1.2	0.5
			1274	200	100	100

где p_i и p_{i+1} – значения атмосферного давления в двух соседних узлах, расположенных на одной параллели, p_j и p_{j+1} – значения атмосферного давления в двух соседних узлах, расположенных на одном меридиане; d_i – расстояние между узлами i и $i+1$, расположенными на одной параллели; d_j – расстояние между двумя соседними узлами, расположенными на одном меридиане.

Минимальное значение величины G из рассчитанных за период 2016–2021 гг. в море Лаптевых наблюдалось 23 декабря 2021 г. и составило $0.31 \text{ гПа/км} \times 10^2$, а максимальное, равное $2.95 \text{ гПа/км} \times 10^2$, – 23 декабря 2018 г. Сопоставление имеющихся полей модальной ориентации разрывов с полями атмосферного давления позволило установить, что изменение существующей системы разрывов всегда происходило при среднем изменении атмосферного давления $G \geq 1.4 \text{ гПа/км} \times 10^2$ и ни разу не происходило при $G < 0.85 \text{ гПа/км} \times 10^2$. При $0.85 \leq G < 1.4 \text{ гПа/км} \times 10^2$ были отмечены случаи как сохранения модальной ориентации разрывов, так и её изменения. По-видимому, в каждой конкретной ситуации на поле дрейфа льда и, как следствие, на систему разрывов оказывали влияние дополнительные факторы, например, сохранение направления воздушных потоков, их интенсивность в предшествующий день.

Для анализа связи изменения ориентации разрывов в ледяном покрове с интенсивностью воздушных потоков над морем поля атмосферного давления были разделены на три типа: с высокой интенсивностью ветровых потоков ($G \geq 1.4 \text{ гПа/км} \times 10^2$), средней ($0.85 \leq G < 1.4 \text{ гПа/км} \times 10^2$) и низкой ($G < 0.85 \text{ гПа/км} \times 10^2$). В ледовый сезон моря Лаптевых, т.е. в ноябре–мае, по данным 2016–2021 гг., высокая интенсивность ветровых потоков отмечалась в 19% случаев, средняя – в 47% случаев, низкая – в 34%. Поскольку используемые в работе данные дрейфа льда имеют двухсуточное осреднение, поля атмосферного давления были поделены на группы, учитывающие тип интенсивности воздушных потоков за два последовательных дня. В табл. 2 приводится повторяемость полученных групп как в течение всего ледового периода 2016–2021 гг., так и рассчитанная по выборке из 200 дат, входящих в этот же период и обеспеченных фактическими данными о разрывах в море Лаптевых. В процентном отношении распределение по группам в имеющейся выборке хорошо согласуется с распределением, полученным по всему шестилетнему периоду, т.е. в этом отношении выборка репрезентативна.

Как видно из данных табл. 2, в рассматриваемый период в море Лаптевых наибольшую повторяемость имеют группы, учитывающие воздушные потоки только средней и низкой интенсивности, на долю которых приходится более 70%

случаев (группы 1–4). В большинстве случаев тип интенсивности на протяжении двух дней сохраняется (группы 1, 2 и 5). Изменение интенсивности происходит постепенно, переход в течение суток от низкого типа к высокому и наоборот встречается крайне редко. Всё изложенное выше соответствует режиму моря Лаптевых, для которого характерно преобладание умеренного ветра, в среднем около 5 м/с (Моря..., 2021). Это обусловлено тем, что в холодный сезон море Лаптевых находится под воздействием антициклонической циркуляции. Циклоны, вызывающие сильные ветры, достигают этого моря значительно реже (Прик, 1971; Добровольский, Залогин, 1982).

Для каждой из выделенных групп 1–7 было проведено сопоставление хода изменения полей атмосферного давления, дрейфа льда и фактической модальной ориентации разрывов. Группы 8 и 9 из-за малого количества исходных данных не рассматривались, однако полученные в ходе анализа остальных групп общие принципы взаимосвязи указанных выше параметров могут быть распространены и на данные этих групп.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сопоставление полей атмосферного давления с оправдываемостью расчётной преобладающей ориентации разрывов, полученной по данным дрейфа за различные дни, позволило выявить некоторые закономерности, присущие всем девяти выделенным группам, и особенности, характерные для каждой из них. Установлено, что система разрывов, сформированная воздушными потоками высокой интенсивности, может сохраняться на протяжении трёх суток и более, если в последующие дни поля атмосферного давления по величине G относились к менее интенсивным типам.

Наличие в поле атмосферного давления циклона, центр которого располагается над акваторией моря, приводит к формированию системы разрывов независимо от интенсивности воздушных потоков в нём. При отсутствии воздушных потоков высокой интенсивности в течение двух суток (случаи, относящиеся к группам 1–4), влияние циклона на дрейф льда сохраняется на протяжении до трёх суток.

Большое влияние на формирование системы разрывов оказывает сохранение подобия в направлении воздушных потоков с интенсивностью не ниже средней в течение нескольких суток. Если на протяжении не менее двух суток направление воздушных потоков практически не менялось при средней их интенсивности, возникновение воздушного потока даже высокой интенсивности, но иного направления, не приводило к смене преобладающей ориентации разрывов. При сохране-

нии направления воздушных потоков средней и высокой интенсивности от двух дней наилучшими для расчёта в подавляющем большинстве случаев были данные дрейфа за день, когда данное направление впервые установилось.

Если на протяжении нескольких суток направление воздушных потоков ежедневно менялось, то для каждой группы существовали свои особенности для определения наилучших данных дрейфа льда для расчёта преобладающего направления разрывов. Для группы 1 учитывалось абсолютное значение величины G за каждые сутки, определяющее тип интенсивности воздушных потоков. В некоторых случаях требовалось дополнительно учитывать и величину изменения G . Установлено, что для групп 3 и 7 наилучшим для расчёта является предшествующий период, в который произошло наиболее существенное изменение G . В случае, когда два дня подряд наблюдаются воздушные потоки высокой интенсивности (группа 5) разного направления, формируется двухмодальная система разрывов, так как вновь образовавшиеся разрывы существуют одновременно с ещё не исчезнувшими разрывами, сформировавшимися ранее.

Все выявленные закономерности были включены в алгоритм разработанного программного обеспечения. Для автоматического определения факта сохранения направления воздушных потоков использовалась методика, основанная на классификации барических ситуаций в море Лаптевых (Порубаев, Дымент, 2021) и дополненная учётом структуры ложбин и гребней.

На основе автоматического анализа ретроспективных полей атмосферного давления определялась оптимальная дата данных дрейфа льда для последующего расчёта преобладающей ориентации разрывов в квадратах сетки. Полученные расчётные значения были сопоставлены со значениями фактической модальной ориентации разрывов. Рассчитанное преобладающее направление разрывов считалось верным, если его отличие от фактического не превышало 30° . В табл. 3 представлена оправдываемость ориентации разрывов, полученной в ходе работы алгоритма. Для сравнения здесь же приводится оправдываемость расчётов, выполненных по данным дрейфа льда за предшествующий день, поскольку, как было показано ранее (см. табл. 1), расчёт по данным этого дня приводил к лучшим результатам.

Средняя оправдываемость после применения алгоритма возросла несущественно по сравнению с расчётом по данным дрейфа предыдущего дня (см. табл. 3). Эффективность составляет менее 5%. Это связано с тем, что в некоторых группах, и в частности, в самой многочисленной группе 1, действительно к наилучшему результату в

Таблица 3. Оправдываемость расчёта преобладающей ориентации разрывов в группах с различным сочетанием типов интенсивности воздушных потоков в течение двух суток и её статистические характеристики в целом по выборке

Номер группы	Количество квадратов, участвовавших в расчёте	Оправдываемость расчёта, %		
		по данным дрейфа за предшествующий день	по данным дрейфа за день, определённый по алгоритму	по данным дрейфа за день, определённый по алгоритму, с учётом различия групп в северной и южной частях моря
1	1918	65.7	66.5	68.7
2	1283	57.5	64.9	68.3
3	848	65.1	67.0	68.3
4	834	66.3	67.0	67.9
5	813	63.0	72.8	74.4
6	475	58.1	62.4	69.3
7	620	68.5	68.5	70.6
8	73	56.2	56.2	63.0
9	36	86.1	86.1	86.1
Минимальная		34.1	41.5	50.0
Максимальная		91.3	91.3	97.4
Средняя		63.6	67.0	69.4
Стандартное отклонение		11.2	9.6	9.5

большинстве случаев приводит расчёт по данным “вчерашнего” дрейфа. Было установлено, что если воздушные потоки средней интенсивности существуют на протяжении двух дней (группа 1), то выбирать для расчёта данные дрейфа иного дня следует только в трёх ситуациях: направление воздушных потоков сохранялось не только в эти два дня, но и в предшествующие им, при этом тип интенсивности по-прежнему был не ниже среднего; два дня назад наблюдался воздушный поток высокой интенсивности; два дня назад наблюдался циклон с центром над акваторией моря. Поскольку такие ситуации встречаются редко, эффект от применения алгоритма для данных группы 1 в целом минимален. Тем не менее, учёт указанных выше особенностей позволяет повысить оправдываемость расчётов в соответствующих случаях.

Применение алгоритма для данных группы 2, объединяющей ситуации с воздушными потоками низкой интенсивности на протяжении двух суток и более, приводит к гораздо более суще-

ственному повышению оправдываемости расчётов. Поскольку при малоградиентном поле атмосферного давления не формируется новая система разрывов, расчёт преобладающей ориентации разрывов по данным дрейфа предыдущего дня заведомо приведёт к ошибочным результатам. В этом случае анализ ретроспективных полей атмосферного давления позволяет определить поле с большей интенсивностью воздушных потоков, которое предположительно могло бы вызвать существенные деформации в ледяном покрове, приводящие к образованию разрывов. В качестве примера на рис. 1 приведены поля атмосферного давления за 4 последовательных дня (11–14 февраля 2021 г.). Наиболее вероятно, что разрывы, наблюдаемые 14 февраля, были образованы дрейфом, вызванным интенсивными воздушными потоками 11 февраля. На рис. 2 представлены результаты расчёта преобладающей ориентации разрывов по данным дрейфа за 11 и 13 февраля. Сопоставление их с фактическими данными модальной ориентации разрывов подтверждает это



Рис. 1. Поля атмосферного давления над акваторией моря Лаптевых 11–14 февраля 2021 г. (а–г): 1 – изобары, гПа.
Fig. 1. Atmospheric pressure fields, Laptev Sea, February 11–14, 2021 (a–g): 1 – isobar, hPa.

предположение. В данном случае оправдываемость расчётов по данным дрейфа за 11 февраля составила 82%, в то время как при расчёте по данным за 13 февраля она бы составила только 34%.

Сложности в определении расчётной преобладающей ориентации разрывов возникают при сохранении малоградиентного поля атмосферного давления на протяжении длительного времени

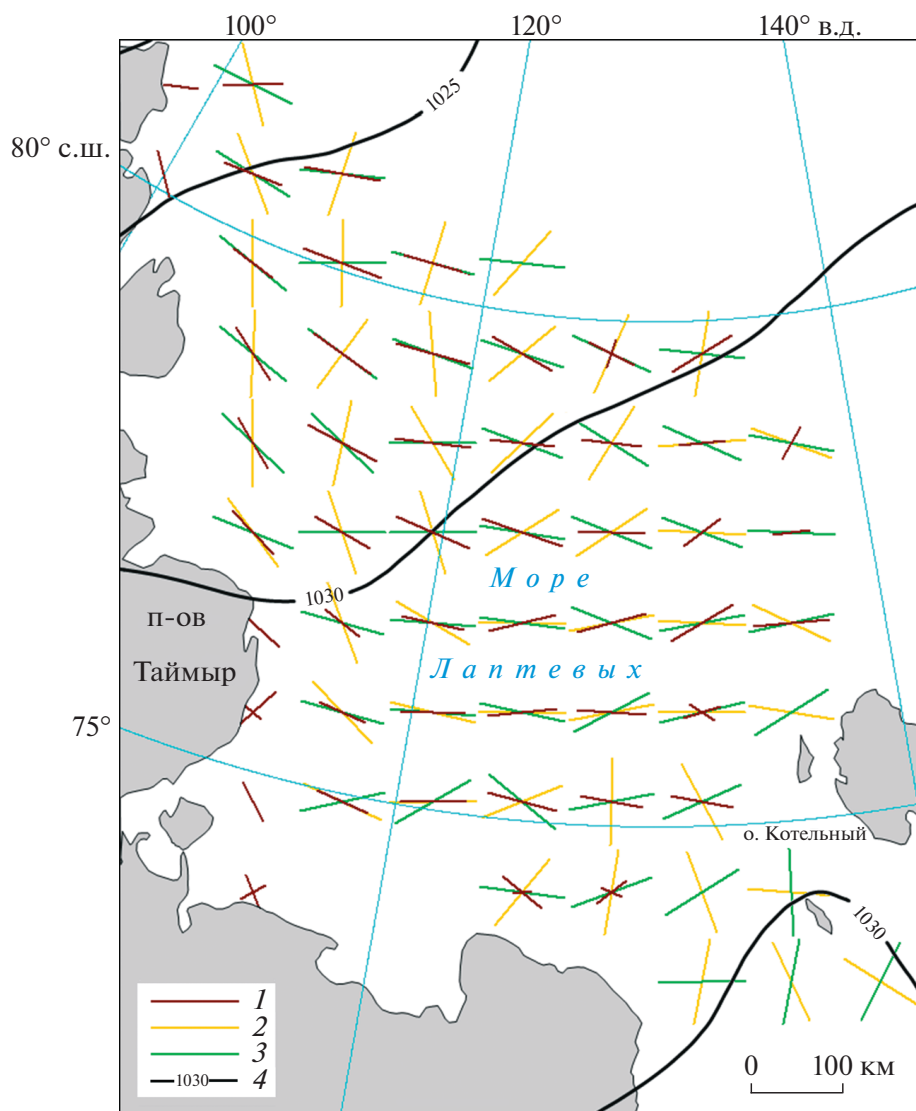


Рис. 2. Рассчитанная преобладающая ориентация разрывов в море Лаптевых:

1 – по фактическим данным 14.02.2021 г.; 2 – по данным дрейфа за 13.02.2021 г.; 3 – по данным дрейфа за 11.02.2021; 4 – изобары, гПа.

Fig. 2. Calculated prevailed orientation of leads in the Laptev Sea

1 – based on actual data on 14.02.2021; 2 – based on ice drift on 13.02.2021; 3 – based on ice drift on 11.02.2021; 4 – isobar, hPa.

(6 суток и более). При этих условиях сложившаяся система разрывов может просуществовать достаточно долго, но за счёт дрейфа льда она будет медленно перемещаться в пространстве без изменения преобладающего направления разрывов. Поскольку осреднение при расчётах производится по квадратам 100×100 км, спустя 5–6 суток образованные под действием интенсивного поля атмосферного давления разрывы могут переместиться в зону соседнего квадрата. По этой причине расчётные значения ориентации разрывов, полученные по данным дрейфа “недельной давности”, могут не соответствовать фактическим данным. Очевидно, в этом случае потре-

буется дополнительный учёт направления и скорости дрейфа льда за расчётный период. В данной работе подобные ситуации не рассматривались, и не были включены в анализируемую выборку.

Наиболее значимый эффект от применения разработанного алгоритма наблюдается в группе 5 (см. табл. 3), объединяющей ситуации, когда в течение двух дней сохранялась высокая интенсивность воздушных потоков. Выявлено, что поле атмосферного давления с величиной G , существенно превышающей нижнее пороговое значение типа с высокой интенсивностью воздушных потоков, приводит к возникновению дрейфа

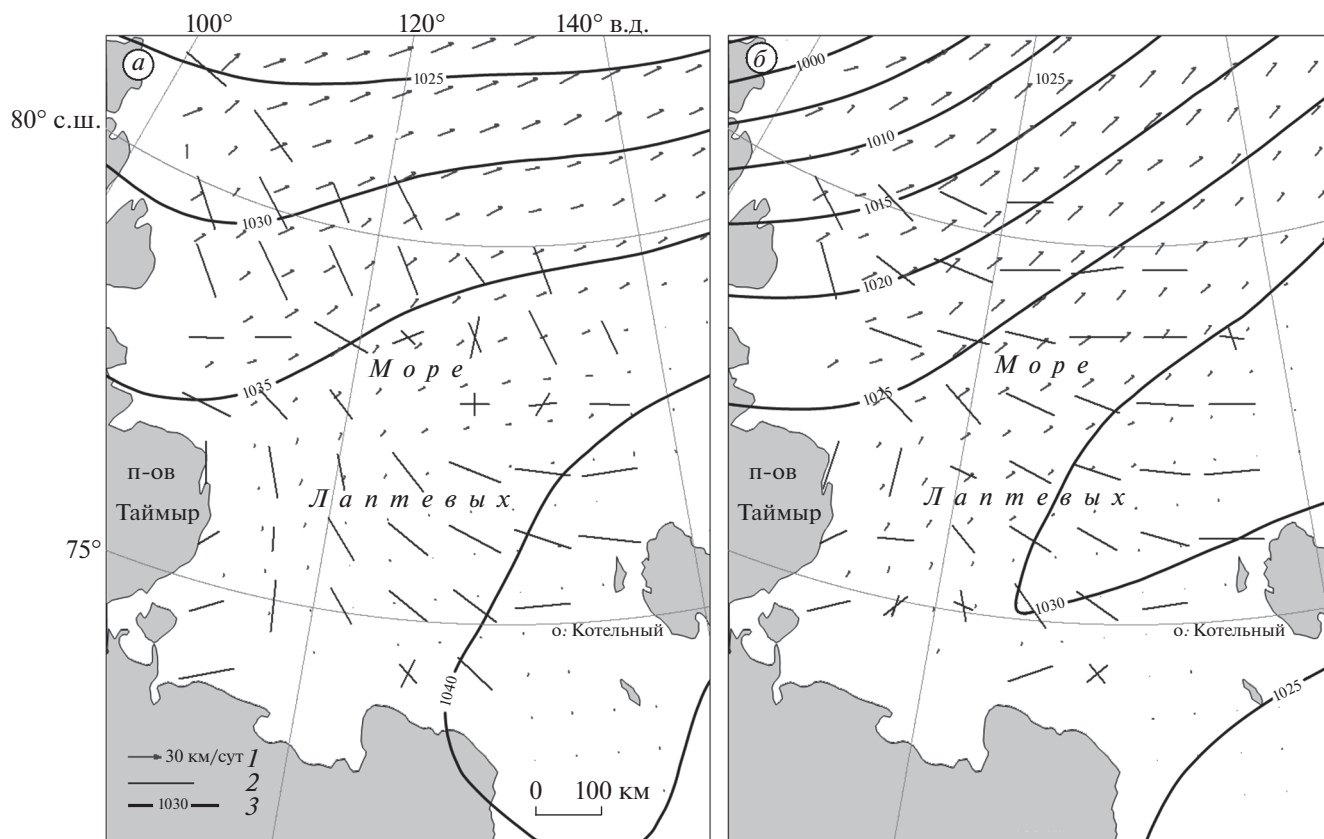


Рис. 3. Поля атмосферного давления, дрейфа льда и фактической модальной ориентации разрывов в море Лаптевых 5.02.2018 (а) и 6.02.2018 (б): 1 – масштабированный вектор скорости дрейфа льда; 2 – фактическая модальная ориентация разрывов; 3 – изобары, гПа.

Fig. 3. Fields of atmospheric pressure, sea ice drift and actual modal orientation of leads in the Laptev Sea on 5.02.2018 (a) and 6.02.2018 (b): 1 – scaled vector of sea ice drift velocity; 2 – actual modal orientation of leads; 3 – isobar, hPa.

льда, формирующего новую систему разрывов в течение суток. Поэтому в случае особенно интенсивных воздушных потоков наилучшими для расчёта являются данные дрейфа текущего дня. Эта же закономерность использовалась при расчёте случаев, относящихся к группе 6, когда интенсивность воздушных потоков в течение двух дней возрастает от средней до высокой.

На рис. 3 в качестве примера представлены поля атмосферного давления средней (а) и высокой (б) интенсивности на 0:00 UTC, существовавшие в два последовательных дня. На этих же рисунках приведена модальная ориентация разрывов, рассчитанная по фактическим данным со снимков ИСЗ, зафиксировавших разрывы в ледяном покрове в эти же дни около 20:00 UTC. Воздушные потоки высокой интенсивности, отмечающиеся в северной части моря 6 февраля, в течение суток изменили преобладающую ориентацию разрывов, тогда как гораздо менее интенсивные потоки в южной части моря не привели к значимым изменениям существовавшей ранее системы разрывов.

Приведённые поля атмосферного давления (см. рис. 3) также иллюстрируют ряд случаев, когда интенсивность воздушных потоков непостоянна по акватории моря, что подтверждается существенным различием модулей скорости дрейфа льда в северной и южной частях моря. Несмотря на достаточно высокое значение $G = 1.76 \text{ гПа/км} \times 10^2$, полученное по морю в целом 6 февраля 2018 г., воздушные потоки в южной части моря в этот день нельзя отнести к интенсивным. Величина G , рассчитанная отдельно для северной и южной частей моря, равна 2.6 и 0.82 $\text{гПа/км} \times 10^2$ соответственно, т.е. к типу с высокой интенсивностью относится только северная часть моря, а южная часть – к типу с низкой интенсивностью. Аналогично, поле атмосферного давления за 5 февраля 2018 г. относится к типу со средней интенсивностью воздушных потоков только за счёт более интенсивной северной части. Таким образом, случай 5–6 февраля 2018 г. можно отнести к группе 6 только в северной части моря. По значениям в южной части моря он относится к группе 2.

Поскольку алгоритм определения даты поля дрейфа льда для расчёта ориентации разрывов учитывает интенсивность воздушных потоков, для корректного его применения было решено разделить море Лаптевых на две части (северную и южную) по 77° с.ш. Для полей атмосферного давления, различающихся по типу интенсивности в северной и южной частях моря, алгоритм применяется отдельно для каждой из них. Определённые в этом случае даты данных по дрейфу льда для расчёта ориентации разрывов для каждой части моря могут оказаться разными.

По сравнению с применением алгоритма к акватории моря в целом оправдываемость расчётной ориентации разрывов, полученной с учётом различия интенсивности воздушных потоков в северной и южной частях моря, повысилась во всех группах кроме 9-й (см. табл. 3). Среднее значение оправдываемости и её среднее квадратическое отклонение приблизились к величинам, полученным при формальном выборе для расчёта данных дрейфа льда, заведомо приводящих к наилучшему результату (см. последний столбец табл. 1). Минимальное значение оправдываемости поднялось до 50%, таким образом, удалось избежать случаев выбора абсолютно неподходящих для расчёта данных дрейфа льда.

ВЫВОДЫ

В ходе проведённого исследования установлено, что существует возможность получать расчётные значения преобладающей ориентации разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых по данным фактического дрейфа льда.

При использовании данных дрейфа OSI SAF для определения преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых в трети случаев наибольшая оправдываемость достигается при расчёте по данным, в которых конечный день периода осреднения совпадает с датой наблюдения разрывов. Однако существует ряд ситуаций, когда такой выбор исходных данных приводит к неудовлетворительным результатам.

Для расчёта преобладающей ориентации разрывов требуется учёт интенсивности воздушных потоков в предшествующие дни, сведений о сохранении подобия в направлении ветра и о наличии циклонов над акваторией моря.

Введён количественный показатель среднего изменения атмосферного давления, на основании значений которого можно судить о типе интенсивности воздушных потоков при автоматическом анализе данных.

Разработаны принципы определения даты поля дрейфа льда, оптимального для расчёта преобладающей ориентации разрывов, для семи из де-

вяти возможных сочетаний типов интенсивности воздушных потоков в предшествующие два дня.

Установлено, что при различии типов интенсивности воздушных потоков в северной и южной частях моря Лаптевых применять разработанный алгоритм определения даты данных дрейфа льда следует к каждой части моря отдельно.

Средняя оправдываемость расчётной преобладающей ориентации разрывов, полученная при применении разработанного алгоритма на выборке из 200 дат за период 2016–2021 гг. составила 69.4% при установленной допустимой ошибке 30° . Оправдываемость менее 60% наблюдалась только в 16% случаев, при этом минимальное из полученных значений равнялось 50%. В 46% случаев оправдываемость расчётов превышала 70%.

В случае, если в предшествующие шесть и более суток над морем Лаптевых сохранялось малоградиентное поле атмосферного давления, разработанный алгоритм определения даты поля дрейфа льда может оказаться неэффективным.

Увеличение количества снимков ИСЗ с дешифрованными разрывами в море Лаптевых позволит проверить работу алгоритма на новой выборке и при необходимости его уточнить.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках НИТР 5.1.1 Росгидромета на 2020–2024 гг. “Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты (криосферы), процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики и технологий гидрометеорологического обеспечения потребителей”.

Acknowledgments. The research was carried out within the framework of the scientific research and technology works 5.1.1 of Roshydromet for 2020–2024. “Development of models, methods and technologies for monitoring and forecasting the state of the atmosphere, ocean, sea ice cover, glaciers and permafrost (cryosphere), processes of interaction of ice with natural objects and engineering structures for the Arctic and technologies for hydrometeorological provision of consumers”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аппель И.Л., Гудкович З.М. Численное моделирование и прогноз эволюции ледяного покрова арктических морей в период таяния. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 144 с.
- Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н., Лосев С.М. Средние многолетние характеристики крупных нарушений сплошности льда в Карском море и в Северо-Во-

- сточной части Баренцева моря. Справочное пособие. СПб.: ААНИИ. 2014. 36 с.
- Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н., Лосев С.М., Фролов С.В. Среднесрочные прогнозы крупных нарушений сплошности льда при гидрометеорологическом обеспечении мореплавания в Арктическом бассейне // *Метеорология и гидрология*. 2008. № 9. С. 78–86.
- Горбунов Ю.А., Карелин И.Д., Лосев С.М. К вопросу о причинах нарушения сплошности морского ледяного покрова в зимний период // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 1986. Вып. 62. С. 110–116.
- Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Метод диагностики и среднесрочного прогноза разрывов в ледяном покрове Карского моря // *Тр. ААНИИ*. 2001. Т. 443. С. 94–102.
- Гудкович З.М., Доронин Ю.П. Дрейф морских льдов. СПб.: Гидрометеоздат, 2001. 111 с.
- Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
- Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лёд. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 318 с.
- Клячкин С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И. Численная модель эволюции ледяного покрова арктических морей для оперативного прогнозирования // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 3. С. 83–96.
- Легеньков А.П. Подвижки и приливные деформации дрейфующего льда. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 104 с.
- Лосев С.М., Горбунов Ю.А. Диагностика и среднесрочный прогноз нарушений сплошности морского ледяного покрова // *Тр. ААНИИ*. 1998. Т. 438. С. 13–25.
- Моря российской Арктики в современных условиях / Ред. И.М. Ашик. СПб.: ААНИИ, 2021. 360 с.
- Назирова М. Льды и взвеси как гидротермодинамические трассеры по данным космических многозональных съёмок. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 161 с.
- Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. 102 с.
- Номенклатура ВМО по морскому льду (WMO Sea Ice Nomenclature). WMO/ОММ/ВМО № 259. 2014 // Электронный ресурс. <http://wdc.aari.ru/wmo/nomen/volume1.html> (Дата обращения: 30.03.2023).
- Порубаев В.С., Дымент Л.Н. Типизация полей атмосферного давления в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2021. Т. 67. № 4. С. 394–405.
- Прик З.М. Климатическое районирование Арктики // *Тр. ААНИИ*. 1971. Т. 304. С. 72–84.
- Смирнов В.Н. Динамические процессы в морских льдах. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 162 с.
- Фролов С.В. Основные закономерности распределения характеристик ледяного покрова и их влияния на движение ледокола в Арктическом бассейне в летний период (по данным высокоширотных плаваний) // *Тр. ААНИИ*. 1997. Т. 437. С. 83–98.
- Фролов С.В., Клячкин С.В. Учёт влияния ориентации разрывов в ледяном покрове на скорость движения судна во льдах // *Тр. ААНИИ*. 2001. Т. 443. С. 103–111.
- Hibler W.D., Weeks W.E., Ackley S., Kovacs A., Campbell W.J. Mesoscale strain measurements on the Beaufort sea pack ice (AIDJEX 1971) // *Journ. of Glaciology*. 1973. V. 12. № 65. P. 187–206. <https://doi.org/10.3189/S0022143000032032>
- Low Resolution Sea Ice Drift Product of the EUMETSAT OSI SAF // Электронный ресурс. <https://osi-saf.eu-metsat.int/products/osi-405-c> (Дата обращения: 30.03.2023).

Citation: Dyment L.N., Ershova A.A., PorubaeV V.S., Chirkova A.A. Determination of the predominant orientation of cracks in ice cover of the Laptev Sea from the ice drift data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (3): 454–468 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423030031

Determination of the Predominant Orientation of Cracks in Ice Cover of the Laptev Sea from the Ice Drift Data

L. N. Dyment^{a,#}, A. A. Ershova^a, V. S. PorubaeV^a, and A. A. Chirkova^a

^aArctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

[#]e-mail: ldyment@yandex.ru

Received April 10, 2023; revised May 25, 2023; accepted June 27, 2023

The paper shows that in order to solve the problem of predicting the predominant orientation of cracks in ice covering the Laptev Sea, when the satellite information is absent, the orientation of cracks in ice cover can be calculated using data on the ice drift in the Sea. We have selected 200 satellite images made in both visible and infrared spectral bands allowing to obtain actual data on ice cracks in the Laptev Sea for seasons

2016–2021, and then calculated the predominant orientation of them using data on the OSI SAF ice drift for the date of each image as well as for several previous days. Results obtained were compared with actual modal orientations of the cracks and with characteristics of the atmospheric pressure fields in these days. It was found that selecting of initial ice drift data should be done with regard for the intensity of air flows, the invariability or constancy of the direction of air flows over the sea aquatory during several days, and the presence of a cyclone centered over the sea area. An algorithm has been developed for automatic selection of a date when the ice drift can be most likely accompanied by formation of cracks on the day under consideration, and calculation of predominant orientation of cracks should be made exactly on that day. The selected data on ice drift serve as a basis for calculating. It was revealed also that with the difference in the types of intensity of air flows in the northern and southern parts of the Laptev Sea, the developed algorithm for determining the date of ice drift should be applied to each part of the sea separately. The number of squares of the Laptev Sea grid in which the calculated orientation of cracks corresponded to its actual meaning with an established permissible error of 30° has been determined. The ratio of this number to the total quantity of grid squares (skill score) was equal to 69% on the average. The skill score exceeded 70% in 46 percent of the cases. The skill score falls below 60% in only 16 percent of the cases, with minimum value of 50%.

Key words: sea ice cover discontinuities, direction of cracks, air flow intensity, ice cover deformation, satellite images

REFERENCES

- Appel I.L., Gudkovich Z.M. *Chislennoe modelirovanie i prognoz evolutsii ledyanogo pokrova arkticheskikh morey v period tayaniya*. Numerical modeling and forecasting of evolution of the Arctic sea ice cover during melting. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 1992: 144 p. [In Russian].
- Gorbunov Yu.A., Dymant L.N., Losev S.M. *Srednie mnogoletnie kharakteristiki krupnih narusheniy sploshnosti l'da v Karskom more i v Severo-Vostochnoy chasti Barentseva morya*. Average long-term characteristics of large ice discontinuities in the Kara Sea and in the Northeastern part of the Barents Sea. Reference book. Saint Petersburg: AARI, 2014: 36 p. [In Russian].
- Gorbunov Yu.A., Dymant L.N., Losev S.M., Frolov S.V. Medium-range forecasts of large ice cover discontinuities for hydrometeorological support of navigation in the Arctic basin. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology, Hydrology. 2008, 9: 78–96 [In Russian].
- Gorbunov Yu.A., Karelin I.D., Losev S.M. On the causes of sea ice cover discontinuities in winter season. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 1986, 62: 110–116 [In Russian].
- Gorbunov Yu.A., Losev S.M., Dymant L.N. Method of diagnostics and medium-range forecast of leads in the ice cover of the Kara Sea. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 2001, V. 443: 94–102 [In Russian].
- Gudkovich Z.M., Doronin Yu.P. *Dreif morskikh l'dov*. Drift of sea ice. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 2001: 111 p. [In Russian].
- Dobrovolskiy A.D., Zalogin B.S. *Morya SSSR*. Seas of the USSR. Moscow: Moscow University Press, 1982: 192 p. [In Russian].
- Doronin Yu.P., Heisin D.E. *Morskoy led*. Sea ice. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1975: 318 p. [In Russian].
- Klyachkin S.V., Guzenko R.B., May R.I. Numerical model of the Arctic sea ice cover evolution for operational forecasting. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (3): 83–96 [In Russian].
- Legenkov A.P. *Podvizhki I prilivnie deformacii drejfuyushego l'da*. Movement and tidal deformation of drift ice. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1988: 104 p. [In Russian].
- Losev S.M., Gorbunov Yu.A. Diagnostics and medium-range forecast of sea ice cover discontinuities. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1998, 438: 13–25 [In Russian].
- Morya Rossiyskoy Arktiki v sovremennih usloviyah*. Seas of the Russian Arctic in modern conditions. Saint Petersburg: AARI, 2021: 360 p. [In Russian].
- Nazirov M. *L'dy i vzvesi kak gidrotermodynamicheskie trassery po dannym kosmicheskikh mnogoazonalnykh s'yomok*. Ice and suspensions as hydrothermodynamic tracers according to multi-zonal space-based surveys. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982: 161 p. [In Russian].
- Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Chast III*. Manual on forecast service. Section 3. Part III. Moscow: TRIADA LTD, 2011: 102 p. [In Russian].
- Sea Ice Nomenclature: Snapshot of the WMO Sea Ice Nomenclature WMO No. 259, 2014: <http://wdc.aari.ru/wmo/nomen/volume1.html> (Last access: 30 March 2023).
- Porubaev V.S., Dymant L.N. Types of atmospheric pressure fields in the Laptev and East Siberian seas. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (4): 394–405 [In Russian].
- Prik Z.M. Climatic zoning of the Arctic. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1971, 304: 72–84 [In Russian].

- Smirnov V.N. Dinamicheskie processy v morskikh l'dah.* Dynamic processes in sea ice. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 1996: 162 p. [In Russian].
- Frolov S.V.* Main regularities of the distribution of sea ice cover characteristics and their impact on movement of icebreaker in the Arctic basin in summer period (according to the data of high-latitude voyages). *Trudy AANII. Proc. of the AARI.* 1997, 437: 83–98 [In Russian].
- Frolov S.V., Klyachkin S.V.* Accounting for the impact of orientation of leads in sea ice cover on the speed of ship movement in ice. *Trudy AANII. Proc. of the AARI.* 2001, 443: 103–111 [In Russian].
- Hibler W.D., Weeks W.E., Ackley S., Kovacs A., Campbell W.J.* Mesoscale strain measurements on the Beaufort sea pack ice (AIDJEX 1971). *Journ. of Glaciology.* 1973, 12 (65): 187–206.
<https://doi.org/10.3189/S0022143000032032>
- Low Resolution Sea Ice Drift Product of the EUMETSAT OSI SAF. Retrieved from: <https://osi-saf.eumetsat.int/products/osi-405-c> (Last access: 30 March 2023).