

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-87-102>

УДК 551.326.032



Метод краткосрочного прогноза преобладающей ориентации разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых в зимне-весенний период

Л.Н. Дымент[✉], А.А. Ершова, В.С. Порубаев

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

[✉]ldymant@aari.ru

ЛНД, 0000-0002-3412-922X; ААЕ, 0009-0006-6545-3635; ВСП, 0000-0003-2941-9772

Аннотация. Разработан способ прогнозирования преобладающей ориентации разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых по прогностическим полям атмосферного давления с заблаговременностью до 3 суток на основе метода аналогов. При составлении прогноза используются ретроспективные данные атмосферного давления, дрейфа льда OSI SAF и разрывов, полученные при дешифрировании снимков искусственных спутников Земли SuomiNPP. Изложены алгоритмы для автоматизации процесса составления прогноза по разработанному методу. Сравнение результатов оправдываемости прогностических значений модальной ориентации разрывов, полученных при применении климатического, инерционного и разработанного методов прогноза, выявило высокую эффективность последнего в случаях перестройки поля атмосферного давления.

Ключевые слова: воздушные потоки, дрейф льда, метод аналогов, модальная ориентация, нарушения сплошности льда, оправдываемость прогноза, спутниковые снимки, эллипс деформации

Для цитирования: Дымент Л.Н., Ершова А.А., Порубаев В.С. Метод краткосрочного прогноза преобладающей ориентации разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых в зимне-весенний период. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1):87–102. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-87-102>

Поступила 02.11.2023

После переработки 19.12.2023

Принята 27.12.2023

Short-term forecasting method for prevailing orientation of leads in the Laptev Sea ice cover during winter-spring season

Liudmila N. Dymant[✉], Anastasiia A. Ershova, Viktor S. Porubaev

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

[✉]ldymant@aari.ru

LND, 0000-0002-3412-922X; ААЕ, 0009-0006-6545-3635; VSP, 0000-0003-2941-9772

Abstract. Sea ice leads are potential routes of easier navigation in the Arctic seas during winter-spring season. Forecasts of the prevailing orientation of ice leads are required for the early selection of the optimal route of a ship in ice. An automated method for short-term forecasting of the prevailing orientation of leads in the Laptev Sea is developed in AARI based on the analog method. Data sources for making a forecast include predictive fields of atmospheric pressure up to 3 days in advance and historical data on surface atmospheric pressure, ice drift and sea ice leads. The data on ice leads are obtained by interpreting SuomiNPP satellite images in a visible and infrared range at 375 m spatial resolution for the cold seasons 2016–2022. The ice drift data are freely available OSI SAF data. In order to make a forecast of the prevailing orientation of leads by a predictive atmospheric pressure field, it is necessary to select from an electronic data archive a historical field of atmospheric pressure that is the most similar to the predictive field. The lead characteristics on the selected date are taken as the predictive ones. Automated selection of an analog consists in searching for an atmospheric pressure field from the electronic data archive which has minimal metrics for the forecast date together with 2 previous days. The metric is calculated as the sum of the squared differences between the change in atmospheric pressure per 1 km in the latitudinal and meridional directions between the predictive atmospheric pressure field and the potential analog field. Actual lead data for a date of the selected analog may not be available due to thick clouds. In this case, the direction of the minor axis of the strain ellipse calculated from ice drift data is taken as the prevailing orientation of leads. The success ratio of diagnostic forecasts by the method developed is 72 %. Comparison of the success ratio of the diagnostic forecasts with the results of inertial and climatic forecasts demonstrates a high effectiveness of the method for cases of abrupt change in the direction of air flows over the Laptev Sea within the first 1–2 days.

Keywords: air flows, analog method, forecast verification, ice discontinuities, ice drift, modal orientation, satellite images, strain ellipse

For citation: Dymnt L.N., Ershova A.A., Porubaev V.S. Short-term forecasting method for prevailing orientation of leads in the Laptev Sea ice cover during winter-spring season. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):87–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-87-102>

Received 02.11.2023

Revised 19.12.2023

Accepted 27.12.2023

Введение

Разрывы представляют собой трещины, каналы и разводья с открытой водой или покрытые льдом не старше молодого. Они являются характерным элементом ландшафта дрейфующего морского ледяного покрова в холодный период года. Протяженность разрывов в зимний период может достигать несколько сотен километров и более, а ширина — от нескольких метров до нескольких километров.

Практический интерес к разрывам вызван возможностью их использования в навигации. Являясь потенциальными маршрутами более легкого плавания, разрывы используются при проводке транспортных судов ледоколами в зимне-весенний период в арктических морях и плавании ледоколов в Арктическом бассейне.

При планировании и реализации морских операций в зимне-весенний период наибольший интерес представляют сведения о попутных разрывах, преобладающее направление которых совпадает с генеральным курсом движения судна или несущественно отличается от него. Использование судоводителями попутных разрывов позволяет увеличить среднюю скорость движения судна более чем в 2 раза по сравнению с ее значениями в зонах льда со сплоченностью 10 баллов и полным отсутствием разрывов [1]. Следовательно, чем больше протяженность пути судна по разрывам, тем меньше временные затраты плавания во льдах и тем выше его безопасность. Таким образом, учет преобладающей ориентации разрывов необходим при выборе оптимального маршрута следования в арктических морях в холодный период года для повышения экономической эффективности судоходства по трассе Северного морского пути (СМП).

Потребность в заблаговременном выборе оптимального маршрута следования судов во льдах с учетом попутных разрывов обуславливает необходимость составления прогнозов преобладающей ориентации разрывов и зон их образования при навигации по СМП в зимне-весенний период.

Проведенные в ААНИИ попытки составления численных прогнозов характеристик разрывов на основе моделей краткосрочного прогноза дрейфа льда оказались неудачными. Несмотря на то, что неравномерность скорости дрейфа льда, возникающая под действием ветра, является основной причиной образования разрывов [2], она не является единственной. На образование разрывов в ледяном покрове влияют дополнительные факторы, такие как приливные явления [3], рельеф дна и береговой черты [4, 5], наличие островов. Учесть все это позволяют аналоговые методы составления прогноза.

Суть аналогового метода прогноза преобладающей ориентации разрывов заключается в подборе по ретроспективным данным срочных полей атмосферного давления, которые в пределах рассматриваемой акватории имеют по структуре максимальное сходство с прогностическим. Такое сходство предполагает совпадение направления воздушных потоков и значений градиента давления, подобие в расположении зон повышенного и пониженного давления и совпадение центров циклонической и антициклонической циркуляций при их нахождении над акваторией моря. Поле атмосферного давления из архива, имеющее наибольшее сходство с прогностическим, принимается за аналоговое. При этом предполагается, что и прогностические значения характеристик разрывов будут близкими к соответствующим значениям, рассчитанным за дату подобранного аналога. Правомерность такого подхода обоснована результатами ранее выполненных исследований [6].

В настоящий момент имеются неавтоматизированные, требующие модернизации методы среднесрочного прогноза преобладающей ориентации разрывов с заблаговременностью от 4 до 6 суток в Арктическом бассейне [7] и в Карском море [8]. Для других морей, через которые проходит СМП, методов прогноза преобладающей ориентации разрывов не существует.

План развития СМП как важной транспортной артерии России предусматривает развитие круглогодичной навигации во всех арктических морях.

Целью нашей работы являлась разработка автоматизированного метода краткосрочного прогноза преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых в зимне-весенний период. Для создания метода требовалось адаптировать аналоговый метод прогноза к акватории моря Лаптевых и разработать алгоритмы для программного обеспечения (ПО), позволяющего автоматизировать самые трудоемкие этапы составления прогноза.

Разработка автоматизированного метода прогноза

Исходные данные

Для получения информации о разрывах использовались находящиеся в свободном доступе снимки искусственных спутников Земли (ИСЗ) SuomiNPP, производящие съемку ледяного покрова в видимом и инфракрасном диапазонах. Достаточно широкая полоса обзора позволяет охватить всю акваторию моря Лаптевых одним снимком. Пространственное разрешение этих снимков составляет 375 м, поэтому получаемые фактические данные относятся только к крупным разрывам, ширина

которых не менее пространственного разрешения снимка ИСЗ. Однако ранее выполненные исследования показали, что преобладающее направление у крупных и у более мелких разрывов совпадает [9, 10].

В настоящее время существуют методы автоматической идентификации разрывов на снимках ИСЗ видимого и ИК диапазонов [11–14]. К сожалению, ни один из них не пригоден для наших целей. Некоторые из них не позволяют определить ориентацию разрывов в пространстве, другие не являются достаточно надежными, т. к. при их применении для автоматического дешифрирования фиксируются ложные разрывы, а часть существующих в действительности игнорируется. Поэтому для формирования электронного архива разрывов в море Лаптевых, который послужит основой для разработки метода прогноза, дешифрирование и оцифровка разрывов на снимках ИСЗ проводились экспертом вручную посредством ГИС. В отличие от автоматической идентификации объектов ледяного покрова, при которой еще на начальном этапе отсекаются зоны, расположенные под маской облачности, эксперт способен увидеть разрывы в ледяном покрове и сквозь легкую облачность. В ходе обработки каждого снимка эксперт фиксирует географические координаты концов каждого относительно прямолинейного отрезка разрыва, т. е. участка разрыва, в пределах которого его ориентация визуально не меняется. Результаты оцифровки заносятся в электронный архив, по данным которого можно рассчитать как ориентацию в пространстве каждого отдельного разрыва, так и преобладающую ориентацию в произвольно выбранной области. К настоящему моменту в электронный архив занесены данные о разрывах в море Лаптевых с 325 снимков ИСЗ за период 2016–2022 гг.

При разработке метода прогноза преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых также использовались ретроспективные данные приземного атмосферного давления и дрейфа льда за 2016–2022 гг. В качестве исходных данных для полей дрейфа льда использовались данные OSI SAF [15], представляющие собой осредненные за 48 часов векторы скорости дрейфа льда в узлах полярной стереографической сетки, охватывающей весь Северный Ледовитый океан, с шагом 62,5 км. Эта информация находится в свободном доступе и обеспечивает полное покрытие данными исследуемой акватории за счет интерполяции отсутствующих векторов из соседних.

Использование при составлении прогнозов исходных данных о разрывах и дрейфе льда за предыдущие 7 лет позволяет избежать дополнительных погрешностей, связанных с климатическими изменениями, происходящими в последние десятилетия.

Автоматизированный подбор аналогов

Для автоматизации процесса подбора аналога прогностического поля атмосферного давления требовалось определить такой критерий, который бы позволял количественно оценить сходство двух полей давления, представленных значениями в узлах географической сетки. Для этого было необходимо сформировать некоторый набор численных значений, который бы описывал структуру произвольного поля атмосферного давления. В качестве такого набора была принята матрица изменения атмосферного давления на 1 км в широтном и меридиональном направлении. При формировании такой матрицы рассчитывались отношения разности атмосферного давления Δp_i в соседних узлах географической сетки к расстоянию между этими узлами r_i .

Матрица изменения атмосферного давления в полной мере отражает структуру поля атмосферного давления, т. к. она характеризует и направление ветровых по-

токов, и их интенсивность. Для примера рассмотрим однонаправленный воздушный поток южного направления, сформированный полем атмосферного давления, приведенным на рис. 1а. Изменение значений давления в двух соседних узлах в меридиональном направлении в этом случае будет близко к нулю, а в широтном направлении соответствующие значения будут отличными от нуля, при этом чем выше интенсивность воздушного потока, тем больше будут значения Δp_i по модулю. При северном направлении воздушных потоков значения Δp_i в широтном направлении будут иметь противоположный знак, а в меридиональном направлении также будут по модулю близки к нулю. Наличие в поле атмосферного давления циклонического вихревого образования, пример которого приведен на рис. 1б, будет характеризоваться близкими к нулю значениями Δp_i как в широтном, так и в меридиональном направлении в районе его центра и отличными от нуля в остальных узлах сетки. При этом направление и интенсивность потока будут выражаться знаком и абсолютным значением Δp_i .

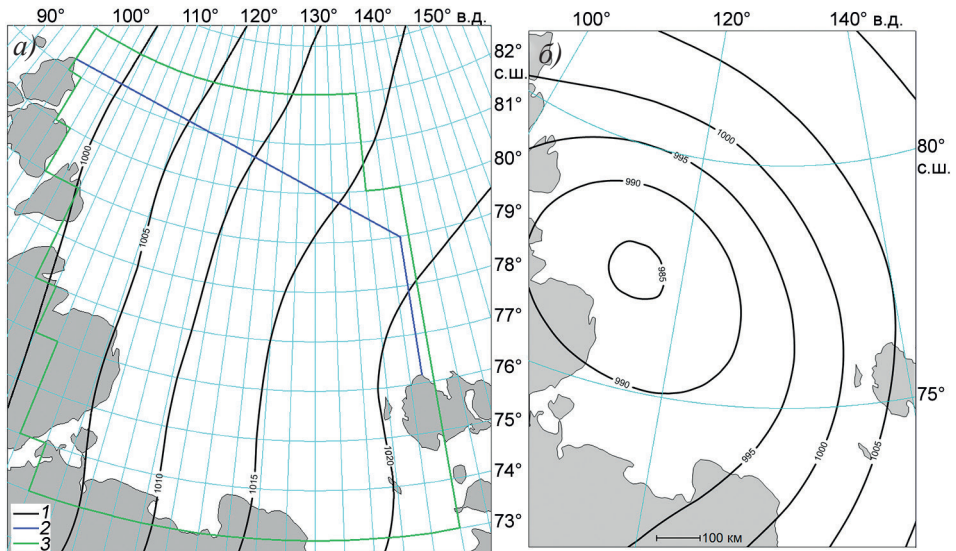


Рис. 1. Поля атмосферного давления в море Лаптевых 1 апреля 2019 г. (а) и 1 мая 2018 г. (б)
1 — изобары, гПа; 2 — граница моря Лаптевых; 3 — граница зоны расчета

Fig. 1. Atmospheric pressure fields, Laptev Sea, April 1, 2019 (a) and May 1, 2018 (b)
1 — isobar, hPa; 2 — boundary of the Laptev Sea; 3 — boundary of the area of calculation

При расчете матрицы изменения атмосферного давления использовались его значения в узлах географической сетки с шагом 1° по широте и 2° по долготе. Зона расчета включала в себя все узлы сетки в пределах акватории моря Лаптевых, а также дополнительные узлы, расположенные к северу и северо-востоку от его границы (см. рис. 1а). Выбор дополнительных узлов был обусловлен следующими соображениями. Западная и южная границы моря Лаптевых являются естественными, т. е. представляют собой береговую черту, а в зимне-весенний период — границу припая. С севера и северо-востока море Лаптевых является открытым, и атмосфер-

ные процессы, существующие за его условной северной границей, могут оказывать влияние на дрейф льда в пределах акватории моря.

Возможность количественно описать структуру поля атмосферного давления позволила перейти к определению количественной меры сходства двух полей атмосферного давления. В качестве такой меры была принята метрика d , выражаемая формулой (1).

$$d^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(\Delta p_i^f - \Delta p_i^a)}{\overline{\Delta p^f} \cdot r_i} \right]^2. \quad (1)$$

В формуле (1) r_i — расстояние между узлами i и $i + 1$ в километрах, $\overline{\Delta p^f}$ — среднее значение изменения атмосферного давления на 1 км в прогностическом поле атмосферного давления. Величина Δp^f используется для нормирования.

В ходе расчета метрики происходит сопоставление соответствующих значений матриц изменения атмосферного давления в двух сравниваемых полях атмосферного давления, в качестве одного из которых выступает прогностическое поле (Δp_i^f) , а второе поле является «претендентом» на статус аналога к нему (Δp_i^a) . Чем меньше значение метрики d , тем меньше различие между двумя сравниваемыми полями атмосферного давления.

По сути, метрика d является евклидовым расстоянием, которое используется в кластерном анализе для группировки объектов. В данном случае в качестве «свойств» объекта выступают значения изменения атмосферного давления между двумя фиксированными точками на акватории моря Лаптевых Δp_i .

При формировании матрицы изменения атмосферного давления при указанном выше шаге по широте и долготе в море Лаптевых используется 350 пар узлов, т. е. значение n в формуле (1) равно 350.

В процессе подбора аналога к прогностическому полю атмосферного давления последовательно рассчитывается метрика за каждый день ледовых сезонов 2016–2022 гг. За аналог принимается поле атмосферного давления, соответствующее минимальному значению метрики при его сравнении с прогностическим.

Подобрать аналог к прогностическому полю в пределах всего моря удастся не всегда. Если после перебора всех ретроспективных полей атмосферного давления минимальное полученное значение метрики тем не менее оказывается слишком большим, следует уменьшить размер области сравнения с акватории всего моря до его северной и южной или западной и восточной частей. Подбор аналога отдельно для каждой из частей моря позволяет в большинстве случаев уменьшить значение метрики. В этом случае итоговый аналог формируется из двух отобранных полей. При раздельном подборе аналогов для северной и южной частей моря Лаптевых границей между ними принята параллель 77° с. ш. При этом расчет метрики для северной части проводится по 200 значениям Δp , а для южной — по 150. При раздельном подборе аналогов для западной и восточной частей моря Лаптевых в качестве границы принят меридиан 120° в. д. в северной части моря и 124° в. д. в южной. Расчет метрики для западной части моря Лаптевых проводится по 185 значениям Δp , а для восточной — по 165.

Если интенсивность воздушных потоков в прогностическом поле атмосферного давления существенно различается в северной и южной или в западной и восточной частях моря, подбор аналога также проводится отдельно для каждой из частей моря.

Расчет прогностических значений преобладающей ориентации разрывов

Ретроспективные фактические данные о разрывах за дату подобранного аналога используются для последующего расчета преобладающей ориентации разрывов, которая принимается за прогностическую. Однако за дату аналога могут отсутствовать фактические данные о разрывах из-за невозможности дешифрирования НСЛ на снимке ИСЗ вследствие плотной облачности. В этом случае, согласно ранее проведенным в ААНИИ исследованиям [6, 16], в качестве преобладающей ориентации разрывов можно использовать расчетное направление малой оси эллипса скорости деформации ледяного покрова, рассчитываемого по полю скорости дрейфа льда.

Ранее предполагалось, что расчет ориентации разрывов следует производить по данным дрейфа льда за дату подобранного аналога, однако анализ результатов выполненных расчетов выявил низкую оправдываемость такого подхода.

Проведенные авторами исследования позволили установить, что при малоградиентном поле атмосферного давления, достаточно часто формирующемся над морем Лаптевых, образование новых разрывов не происходит. Расчет преобладающей ориентации разрывов по данным дрейфа, соответствующим такому полю давления, не совпадает с фактическими данными, т. к. в этом случае в ледяном покрове присутствуют разрывы, сформированные ранее при более интенсивном дрейфе. Также было установлено, что циклон, центр которого находится в пределах акватории моря Лаптевых, даже при малоградиентном поле давления приводит к формированию системы разрывов. Система разрывов может сохраняться длительное время, пока ее не изменит другой интенсивный воздушный поток.

Инерционность локализации и ориентации разрывов, а также выявленные закономерности их поведения в зависимости от изменения интенсивности и направления воздушных потоков легли в основу алгоритма определения даты образования существующей в заданный момент системы разрывов в море Лаптевых и, соответственно, даты поля дрейфа льда, приведшего к ее возникновению. Данные дрейфа льда OSI SAF за установленную дату используются для расчета преобладающей ориентации разрывов при отсутствии фактических данных о НСЛ. Подробно основы разработанного алгоритма и способ его реализации изложены в [17]. Здесь лишь отметим, что для моря Лаптевых система разрывов, полученная по данным ИСЗ на конкретный момент времени, в подавляющем большинстве случаев сформирована полем дрейфа в один из предыдущих дней.

При составлении прогнозов в качестве преобладающего направления разрывов использовалась их модальная ориентация. Модальная ориентация разрывов представляет собой направление, в диапазоне $\pm 20^\circ$ от которого суммарная протяженность разрывов в зоне расчета является наибольшей. Если в рассматриваемой зоне выделяется два близких по значимости направления разрывов, то распределение ориентации считается двумодальным. Расчет модальной ориентации разрывов осуществлялся по квадратам 100×100 км, на которые была разбита акватория моря Лаптевых. Выбор размера квадрата сетки был обусловлен количеством имеющейся исходной информации о разрывах.

Составление диагностических прогнозов

Проверка метода осуществлялась посредством диагностических прогнозов. При составлении диагностических прогнозов в качестве прогностического поля атмосферного давления выбирается одно из ретроспективных полей, за дату которого имеются данные о разрывах в электронном архиве. Это дает возможность сопоставить результаты составленного прогноза с истинной модальной ориентацией разрывов, т. е. ориентацией, рассчитанной по фактическим данным за дату, принятую за прогностическую. При составлении диагностических прогнозов за прогностические принимались только даты, за которые фактическими данными о разрывах было обеспечено более трети акватории моря.

Для составления прогноза преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых по вышеизложенному алгоритму было разработано специализированное ПО. В результате его работы из срочных данных атмосферного давления за ледовые сезоны 2016–2022 гг. отбиралось по 5 аналогов для каждого из пяти районов: для всей акватории моря Лаптевых и для его северной, южной, западной и восточной частей. Эксперту предоставлялась информация о дате каждого потенциального аналога, величине метрики d , количестве фактических данных о разрывах за дату аналога. Кроме того, эксперт располагал данными о наличии циклона над акваторией моря и существовании различия в интенсивности воздушных потоков в прогностическом поле атмосферного давления в северной и южной или в западной и восточной частях моря. На основании этой информации экспертом принималось решение о возможности использования аналога, подобранного для всего моря целиком, либо мозаики из аналогов, подобранных для частей моря. Установлено, что если в прогностическом поле атмосферного давления над морем Лаптевых располагается центр циклона, то следует подбирать аналог только ко всей акватории моря в целом.

Затем для выбранных районов эксперт выбирал аналог с наименьшим значением метрики. При близких значениях метрики у нескольких аналогов предпочтение отдавалось аналогу, обеспеченному фактическими данными на большей части акватории моря, дата которого относится к тому же сезону, что и дата прогноза.

После принятия экспертом окончательного решения о дате используемого аналога (или двух аналогов в случае выбора расчета по частям) и ввода ее в интерактивном режиме ПО формирует массив прогностических значений модальной ориентации разрывов по квадратам сетки, рассчитанных по фактическим данным о разрывах за дату аналога и дополненных, при необходимости, расчетными значениями по данным дрейфа льда за соответствующую дату. Установлено, что при отсутствии фактических данных о разрывах за дату аналога можно воспользоваться фактическими данными за последующий день (при их наличии), если интенсивность поля атмосферного давления в этот день была низкой.

Результаты составленного прогноза сравнивались с реальными данными путем расчета оправдываемости прогноза. Оправдываемость прогноза — это отношение количества квадратов сетки, в которых прогностическая преобладающая ориентация разрывов отличалась от фактической не более чем на 30° , к общему числу квадратов, по которым составлялся прогноз. Допуск в 30° был принят исходя из [18], согласно которому для краткосрочных прогнозов величина допустимой ошибки не должна превышать 0,674 от ее среднего квадратического отклонения. Опыт ледового плавания также показывает, что разрывы, ориентация которых отклоняется от генерального



Рис. 2. Поля атмосферного давления и модальная ориентация разрывов: *a* — 29 декабря 2017 г. (поле, принятое за прогностическое); *б* — 21 апреля 2020 г. (поле, принятое за аналог); *в* — 28 декабря 2017 г. (поле, предшествующее прогностическому); *з* — 20 апреля 2020 г. (поле, предшествующее аналогу). 1 — изобары, гПа; 2 — модальная ориентация, рассчитанная по фактическим данным о разрывах; 3 — модальная ориентация, рассчитанная на основе данных по дрейфу льда

Fig. 2. Atmospheric pressure fields and modal orientation of leads: *a* — December 29, 2017 (field taken as a prognostic one); *б* — April 21, 2020 (field taken as an analog); *в* — December 28, 2017 (field for a day before prognostic date); *з* — April 20, 2020 (field for a day before analog date). 1 — isobar, hPa; 2 — modal orientation calculated from actual lead data; 3 — modal orientation calculated from ice drift data

курса судна не более чем на 30° , могут считаться попутными и эффективно использоваться в навигации [19].

При составлении диагностических прогнозов были зафиксированы случаи, когда при хорошем аналоге, характеризующемся низким значением метрики, преобладающая ориентация разрывов в даты аналога и прогноза существенно различалась. В примере, представленном на рис. 2, при хорошем показателе сходства атмосферных полей (см. рис. 2а и 2б) оправдываемость прогноза преобладающей ориентации разрывов по подобранному аналогу низкая: квадраты, в которых различие прогностических и фактических значений модальной ориентации разрывов не превышает 30° (на рис. 2а и 2б отмечены зеленой заливкой), составляют лишь 40 % от общего количества квадратов, участвующих в диагнозе.

Проведенный анализ фактических данных позволил выявить существование инерции преобладающей ориентации разрывов при смене направления воздушных потоков. Даже при кардинальной смене направления ветровых потоков и высокой их интенсивности значение модальной ориентации разрывов сохранялось в течение суток в пределах допуска не менее чем в 60 % квадратов. При расчете по всем данным электронного архива значения модальной ориентации разрывов за два последовательных дня различались не более чем на 30° в 90 % квадратов. Таким образом, существующая в день прогноза система разрывов чаще всего сформирована под действием полей атмосферного давления в предыдущие дни. Поэтому при подборе аналога необходимо учитывать не только сходство его поля атмосферного давления с прогностическим, но и сходство соответствующих полей за 1–2 предшествующих дня.

В представленном примере (см. рис. 2) в дни, предшествующие датам прогноза и аналога, структура полей атмосферного давления существенно различалась (см. рис. 2в и 2г).

Учет в процессе выбора аналога сходства полей атмосферного давления не только за дату прогноза, но и за 1–2 предшествующих дня существенно повышает оправдываемость прогнозов. На рис. 3 представлен аналог, подобранный к тому же прогностическому полю атмосферного давления (см. рис. 2а) с учетом сходства полей за текущий и предшествующий дни. Оправдываемость прогноза преобладающей ориентации разрывов в этом случае возросла до 85 %.

В настоящее время в алгоритме подбора аналога учитывается сходство полей атмосферного давления с прогностическими в течение трех суток, то есть за дату прогноза и два предшествующих дня. При этом если дате прогноза соответствует малоградиентное поле атмосферного давления, то за прогностическую принимается предшествующая ей дата, т. к. установлено, что малоградиентное поле не формирует новую систему разрывов и преобладающая ориентация разрывов не изменяется.

При вычислении итоговой метрики d^* предварительно по формуле (1) рассчитываются метрики d_1 , d_2 , d_3 для каждого из трех учитываемых дней. При этом d_1 определяет меру сходства прогностического поля атмосферного давления с полем атмосферного давления за дату потенциального аналога, d_2 — меру сходства поля атмосферного давления за день, предшествующий дате прогноза, с полем атмосферного давления, зафиксированным на 1 день ранее даты потенциального аналога. Соответственно, d_3 — мера сходства двух полей атмосферного давления, существовавших за 2 дня до даты прогноза и даты потенциального аналога.

Short-term forecasting method for prevailing orientation of leads in the Laptev Sea ice cover...

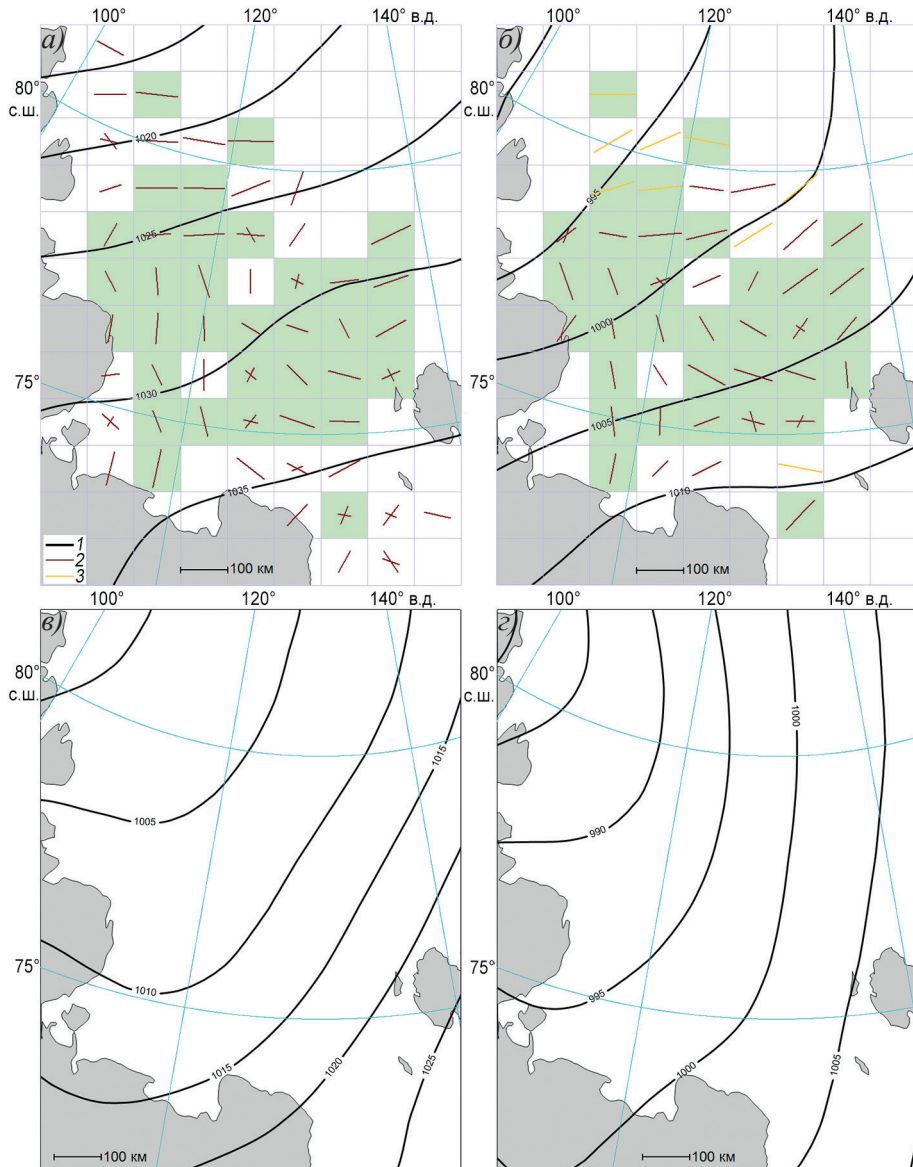


Рис. 3. Поля атмосферного давления и модальная ориентация разрывов: *а* — 29 декабря 2017 г. (поле, принятое за прогностическое); *б* — 14 января 2020 г. (поле, принятое за аналог); *в* — 28 декабря 2017 г. (поле, предшествующее прогностическому); *г* — 13 января 2020 г. (поле, предшествующее аналогу). 1 — изобары, гПа; 2 — модальная ориентация, рассчитанная по фактическим данным; 3 — модальная ориентация, рассчитанная на основе данных по дрейфу льда

Fig. 3. Atmospheric pressure fields and modal orientation of leads: *a* — December 29, 2017 (field taken as a prognostic one); *б* — January 14, 2020 (field taken as an analog); *в* — December 28, 2017 (field for a day before prognostic date); *г* — January 13, 2020 (field for a day before analog date). 1 — isobar, hPa; 2 — modal orientation calculated from actual lead data; 3 — modal orientation calculated from ice drift data

$$d^* = k_1 d_1^2 + k_2 d_2^2 + k_3 d_3^2 \quad (2)$$

$$k_i = G_i / \sum_{i=1}^3 G_i, \sum_{i=1}^3 k_i = 1.$$

Коэффициенты k_1 , k_2 и k_3 в формуле (2) обеспечивают учет метрик d_1 , d_2 , d_3 пропорционально средней интенсивности поля атмосферного давления G за соответствующий день, т. к. чем интенсивнее воздушные потоки, тем большее влияние они оказывают на дрейф льда и, как следствие, на формирование разрывов. Подробно методика количественной оценки интенсивности поля атмосферного давления G приведена в работе [17].

Оправдываемость диагностических прогнозов

По разработанному методу было составлено 80 диагностических прогнозов. Средняя оправдываемость прогноза преобладающей ориентации разрывов составила 72 %. Максимальное значение оправдываемости достигало 95 %, минимальное — 50 %. Для качественной оценки полученного среднего значения оправдываемости его требовалось сопоставить с соответствующими значениями, полученными по другим методам прогноза, а именно по климатическому и инерционному.

Для расчета климатических значений модальной ориентации разрывов мы воспользовались данными, предоставленными [13], полученными в результате распознавания разрывов в ледяном покрове на снимках ИСЗ методом нейронных сетей. Эти данные находятся в свободном доступе и охватывают период с 2002 по 2020 г. Средняя оправдываемость прогнозов, составленных по климатическим данным, оказалась равной 54 %. Столь низкое значение объясняется значительной изменчивостью, свойственной ориентации разрывов в море Лаптевых.

Для определения средней оправдываемости инерционных прогнозов преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых мы воспользовались собственным архивом данных. Инерционность ледовых процессов и присущая морю Лаптевых преимущественно низкая интенсивность воздушных потоков [20] приводят в большинстве случаев к сохранению модальной ориентации разрывов на протяжении нескольких дней. Значимое изменение модальной ориентации разрывов происходит при смене направления воздушных потоков высокой интенсивности, что в море Лаптевых случается не так часто. Поэтому для оценки эффективности разработанного метода по сравнению с инерционным прогнозом были отобраны диагностические прогнозы на даты, накануне которых произошла существенная перестройка поля атмосферного давления и, как следствие, поля дрейфа льда. Таких дней оказалось только 12, т. к. такие ситуации вообще наблюдаются в море Лаптевых достаточно редко [17], и кроме того требовалось выбрать даты, обеспеченные исходными данными о разрывах на большей части акватории моря за 1–2 дня до и после смены направления воздушных потоков значительной интенсивности. В таблице приводятся результаты сравнения оправдываемости прогнозов, составленных по разработанному методу, с климатическими и инерционными прогнозами.

Как видно из данных таблицы, в случае существенного изменения поля атмосферного давления разработанный метод на 20 % эффективнее инерционного прогноза и на 26 % — климатического.

Таблица

**Оправдываемость прогнозов модальной ориентации разрывов
в случае смены направления воздушных потоков в течение 1–3 суток, %**

Table

**The accuracy of forecasts of the modal orientation of ruptures
in the event of a change in the direction of air flows within 1–3 days, %**

Прогноз	Оправдываемость прогноза, %		
	Средняя	Минимальная	Максимальная
По разработанному методу	69	54	80
Климатический	43	29	66
Инерционный	49	28	60

Следует отметить тот факт, что, несмотря на высокую оправдываемость инерционных прогнозов преобладающей ориентации разрывов при сохранении структуры полей атмосферного давления на протяжении нескольких дней, не всегда существует возможность их использовать. Наличие плотной облачности может не позволить дешифровать разрывы на снимках ИСЗ видимого и ИК диапазонов на дату составления прогноза, хотя с высокой долей вероятности будет известно, что в ближайшие 1–3 дня модальная ориентация разрывов сохранится.

Все составленные диагностические прогнозы модальной ориентации разрывов с низкой оправдываемостью (менее 60 %) были дополнительно проанализированы для выявления причин расчетной ошибки. Выявлено, что наиболее часто низкие значения оправдываемости прогноза соответствовали ситуациям, когда в течение 4 суток и более над морем Лаптевых наблюдалось малоградиентное поле атмосферного давления и система разрывов оставалась неизменной в течение всего этого периода. Как показала практика, подбор аналога к полю атмосферного давления со значимой интенсивностью, но отстоящего от прогностической даты на 5 суток и более приводит к неудовлетворительным результатам прогноза.

Несколько случаев прогнозов с низкой оправдываемостью были выявлены при сохранении в течение трех суток высокой интенсивности воздушных потоков, но при этом ежедневно изменяющих направление. Поскольку интенсивные воздушные потоки на протяжении нескольких дней наблюдаются в море Лаптевых редко, вероятность подбора хорошего аналога из электронного архива в этом случае невелика.

В целом же результат составленного прогноза определяется степенью адекватности подобранного аналога. Чем точнее удастся его подобрать, тем меньше различия в направлении и интенсивности воздушных потоков, возникающих при прогностическом и аналоговом полях атмосферного давления, что приводит затем к более высоким значениям оправдываемости прогноза.

Кроме этого, анализ результатов составленных прогнозов выявил, что значения преобладающей ориентации разрывов, рассчитанные по фактическим данным, более надежны, чем полученные при дополнительных расчетах по данным дрейфа льда. Увеличение количества фактических данных путем пополнения электронного архива разрывов позволит реже прибегать к таким расчетам, что повысит оправдываемость прогнозов.

Заключение

Разработанный метод позволяет определить с заблаговременностью до 3 суток преобладающую ориентацию разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых с пространственной дискретностью 100 км. Эта прогностическая информация имеет важное прикладное значение, так как дает возможность судоводителям планировать оптимальный маршрут следования судов по морю Лаптевых в зимне-весенний период.

Разработанный метод также может быть использован для диагностики преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых по фактическим полям атмосферного давления, если отсутствует возможность в оперативном режиме получить данные о разрывах в ледяном покрове по спутниковым снимкам.

Пополнение архивов данных атмосферного давления и дрейфа льда позволит сократить число редких синоптических ситуаций, не имеющих аналогов.

Пополнение электронного архива данных результатами обработки снимков ИСЗ постоянно продолжается, тем самым увеличивается количество потенциальных аналогов, обеспеченных фактической информацией о разрывах. Это позволит повысить оправдываемость и надежность прогнозов.

Конфликт интересов. Авторы не имеют конфликта интересов.

Финансирование. 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».

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. 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 / REFERENCES

1. Фролов С.В. Влияние ориентации нарушений сплошности льда на эффективность движения судов в Арктическом бассейне в летний период. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2013;(3):35–45.
Frolov S.V. Impact of orientation of ice discontinuities on the efficiency of ship traffic in the Arctic basin in summer. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2013;(3):35–45. (In Russ.)
2. 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;62:110–116.
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 Russ.)
3. Назиров М. *Льды и взвеси как гидротермодинамические трассеры по данным космических многозональных съемок*. Л.: Гидрометеиздат; 1982. 161 с.
4. Волков Н.А., Гудкович З.М. Основные итоги изучения дрейфа льдов в Арктическом бассейне. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 1967;27:55–64.

- Volkov N.A., Gudkovich Z.M. Main results of study of ice drift in the Arctic basin. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 1967;27:55–64. (In Russ.)
5. Гудкович З.М., Доронин Ю.П. *Дрейф морских льдов*. СПб.: Гидрометеиздат; 2001. 112 с.
 6. Лосев С.М., Горбунов Ю.А. Диагностика и среднесрочный прогноз нарушений сплошности морского ледяного покрова. *Труды АН ИИИ*. 1998;438:13–25.
Losev S.M., Gorbunov Yu.A. Diagnostics and medium-range forecast of sea ice cover discontinuities. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo institute = Proc. of AARI*. 1998;438:13–25. (In Russ.)
 7. Горбунов Ю.А., Дыммент 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):78–86.
Gorbunov Yu.A., Dyment 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. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2008;33(9): 594–599. <https://doi.org/10.3103/S1068373908090070>
 8. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дыммент Л.Н. Метод диагностики и среднесрочного прогноза разрывов в ледяном покрове Карского моря. *Труды АН ИИИ*. 2001;443:94–102.
Gorbunov Yu.A., Losev S.M., Dyment L.N. Method of diagnostics and medium-range forecast of leads in the ice cover of the Kara Sea. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo institute = Proc. of AARI*. 2001;443:94–102. (In Russ.)
 9. Лосев С.М., Горбунов Ю.А., Дыммент Л.Н. Оценка характеристик разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых по снимкам самолетного радиолокатора бокового обзора и снимкам со спутников Земли «Метеор» и «НОАА». *Метеорология и гидрология*. 2003;(2):59–67.
Losev S.M., Gorbunov Yu.A., Dyment L.N. Assessment of characteristics of leads in the Laptev Sea ice cover based on side-looking airborne radar images and images from “Meteor” and “NOAA” satellites. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2003;(2):59–67. (In Russ.)
 10. Дыммент Л.Н., Аксенов П.В., Лосев С.М., Порубаев В.С. Влияние пространственного разрешения снимков ИСЗ на получаемые значения характеристик разрывов в ледяном покрове арктических морей. *Исследование Земли из космоса*. 2021;3:81–86. <https://doi.org/10.31857/S0205961421030039>
Dyment L.N., Aksenov P.V., Losev S.M., Porubaev V.S. Influence of the spatial resolution of satellite images on the obtained values of the characteristics of leads in the ice cover of the Arctic seas. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021;57(9):1081–1086. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090462>
 11. Смирнов В.Г., Бычкова И.А., Захваткина Н.Ю. Разработка методов оперативной оценки нарушений сплошности ледяного покрова с использованием спутниковой информации. *Российские полярные исследования*. 2022;(1):5–7.
Smirnov V.G., Bychkova I.A., Zakhvatkina N.Iu. Development of methods for operational assessment of ice cover discontinuities by means of satellite information. *Rossiyskie poliarnye issledovaniia = Russian polar Investigations*. 2022;(1):5–7. (In Russ.)
 12. Hoffman J.P., Ackerman S.A., Liu Y., Key J.R. The detection and characterization of Arctic Sea ice leads with satellite imagers. *Remote Sensing*. 2019;11(5):521. <https://doi.org/10.3390/rs11050521>
 13. Hoffman J.P., Ackerman S.A., Liu Y., Key J.R., McConnell I.L. Application of a convolutional neural network for the detection of sea ice leads. *Remote Sensing*. 2021;13(22):4571. <https://doi.org/10.3390/rs13224571>
 14. Willmes S., Heinemann G. Pan-Arctic lead detection from MODIS thermal infrared imagery. *Annals of Glaciology*. 2015;56(69): 29–37. <https://doi.org/10.3189/2015AoG69A615>
 15. *Low Resolution Sea Ice Drift Product of the EUMETSAT OSI SAF*. URL: <https://osi-saf.eumetsat.int/products/osi-405-c>. (accessed 24.10.2023).

16. Волков Н.А., Гудкович З.М., Углев В.Д. Результаты изучения неравномерности дрейфа льда в Арктическом бассейне. *Труды ААНИИИ*. 1971;303:76–88.
Volkov N.A., Gudkovich Z.M., Uglev V.D. Results of the study of non-uniform drift in the Arctic basin. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo institute = Proc. of AARI*. 1971;303:76–88. (In Russ.)
17. Дымент Л.Н., Ершова А.А., Порубаев В.С., Чиркова А.А. Расчет преобладающей ориентации разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых по данным дрейфа льда. *Лед и снег*. 2023;63(3):454–468. <https://doi.org/10.31857/S2076673423030031>
Dyment L.N., Ershova A.A., Porubaev V.S., Chirkova A.A. Calculation of the prevailing orientation of leads in the Laptev Sea ice cover based on ice drift data. *Led i sneg = Ice and snow*. 2023;63(3):454–468. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673423030031>
18. *Наставление по службе прогнозов*. Раздел 3. Часть III. М.: Триада ЛТД; 2011. 102 с.
19. Фролов С.В., Клячкин С.В. Учет влияния ориентации разрывов в ледяном покрове на скорость движения судна во льдах. *Труды ААНИИИ*. 2001;443:103–111.
Frolov S.V., Kliachkin S.V. Accounting for the impact of orientation of leads in sea ice cover on the speed of ship movement in ice. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo institute = Proc. of AARI*. 2001;443:103–111. (In Russ.)
20. *Моря российской Арктики в современных условиях*. СПб.: ААНИИ; 2021. 360 с.