ЛЁД И СНЕГ, 2025, том 65, № 1, с. 120–134

МОРСКИЕ, РЕЧНЫЕ И ОЗЁРНЫЕ ЛЬДЫ

УДК 551.326.1: 551.383. (268.52)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТАЦИОНАРНОСТЬ ПОЛЫНЕЙ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

© 2025 г. А. Б. Тимофеева[1,*], А. В. Рубченя[3], Р. И. Май[1,2]

[1]Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
[2]Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия
[3]Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, Россия
**e-mail: tianna@aari*

Поступила 04.09.2024 г.
После доработки 06.11.2024 г.
Принята к печати 25.12.2024 г.

Выполнена оценка пространственно-временно́й повторяемости, изменчивости положения и площадей заприпайных полыней в море Лаптевых с использованием метода расчёта вероятности пересечений полигонов, по данным электронного архива региональных ледовых карт ААНИИ. Получено пространственное распределение зон с 50%-й повторяемостью полыней, выявлен положительный тренд площади полыней, смена локализации полыней в сезонном ходе, угнетение отрезка Западно-Новосибирской полыньи.

Ключевые слова: полынья, Море Лаптевых, полигоны, морской лёд, припай

DOI: 10.31857/S2076673425010092, **EDN**: GYRSMP

ВВЕДЕНИЕ

Полыньи представляют собой особый природный феномен, формирующийся в холодный сезон в полярных морях. К заприпайным полыньям относят пространства чистой воды, начальных и молодых льдов толщиной до 30 см, образующиеся между кромкой припая и дрейфующими льдами (Бородачев и др., 1994).

Полыньи формируются во всех морях Сибирского шельфа, в том числе в море Лаптевых, и обладают высокой повторяемостью. Основным фактором формирования заприпайных полыней являются отжимные ветры, могут оказывать влияние также тёплые воды стока рек в море Лаптевых, это в первую очередь сток реки Лены (Купецкий, 1959; Захаров, 1966). Существуют также предположения о том, что на формирование полыней могут влиять и внутренние волны (Морозов, Писарев, 2004). Полыньи играют важную роль в теплообмене между океаном и атмосферой (Макштас, 1984; Fiedler et al., 2010). В результате активного энерго- и массообмена происходят процессы ледообразования, конвекции в толще вод, образование плотных вод, перенос тепла от океана в атмосферу (Kassens, Thiede, 1994; Cavalieri, Martin, 1994). Вследствие градиента температур морской воды и воздуха и возникающего в результате этого потока тепла в заприпайных полыньях ндёт непрерывное ледообразование, что, благодаря постоянному выносу вновь образовавшихся молодых льдов отжимными ветрами, превращает полыньи в значимый источник новых льдов в море (Макштас, 1984). В весенне-летний период заприпайные полыньи становятся очагами освобождения поверхности моря от морского льда (Опасные..., 2010). В районе развитых заприпайных полыней формируются специфичные арктические экосистемы, в которых планктон, бентос и нектон привлекают птиц и морских млекопитающих (Гуков, 1999). Предпринимаются попытки реконструкции расположения полыней по геохимическим данным (Астахов и др., 2023). Немаловажен также и факт использования акватории полыней в хозяйственной деятельности. С точки зрения навигации заприпайные полыньи служат одним из возможных путей следования судов в осенний и зимний периоды, что стало особенно важным в последнее время, в связи с возрастанием грузооборота по трассе Северного морского пути. Всё вышеперечисленное делает полыньи значимым объектом исследования.

Одна из характеристик заприпайных полыней – их повторяемость, определяющая временну́ю устойчивость полыньи. По принятой классификации выделяют стационарные (повторяемость

более 75%), устойчивые (повторяемость более 50%) и эпизодические (повторяемость менее 50%) (Карелин, Карклин, 2012). В море Лаптевых выделяются пять полыней (рис. 1): Восточная Североземельская (далее ВСЗ), Северо-Восточная Таймырская (далее СВТ), Восточная Таймырская (далее ВТ), Анабаро-Ленская (далее АЛ) и Западная Новосибирская (далее ЗН) полыньи (Карелин, Карклин, 2012). К морфометрическим характеристикам, подробно описанным и рассчитанным в предыдущих исследованиях, относят длину, ширину и площадь (наиболее используемым для характеристики полыней параметром является площадь). При определении положения заприпайных полыней использовалась система створов, сформированная на основе экспертного анализа ледовой информации за длительный период (с 30-х годов XX века) (Карелин, Карклин, 2012). Створы разделяют

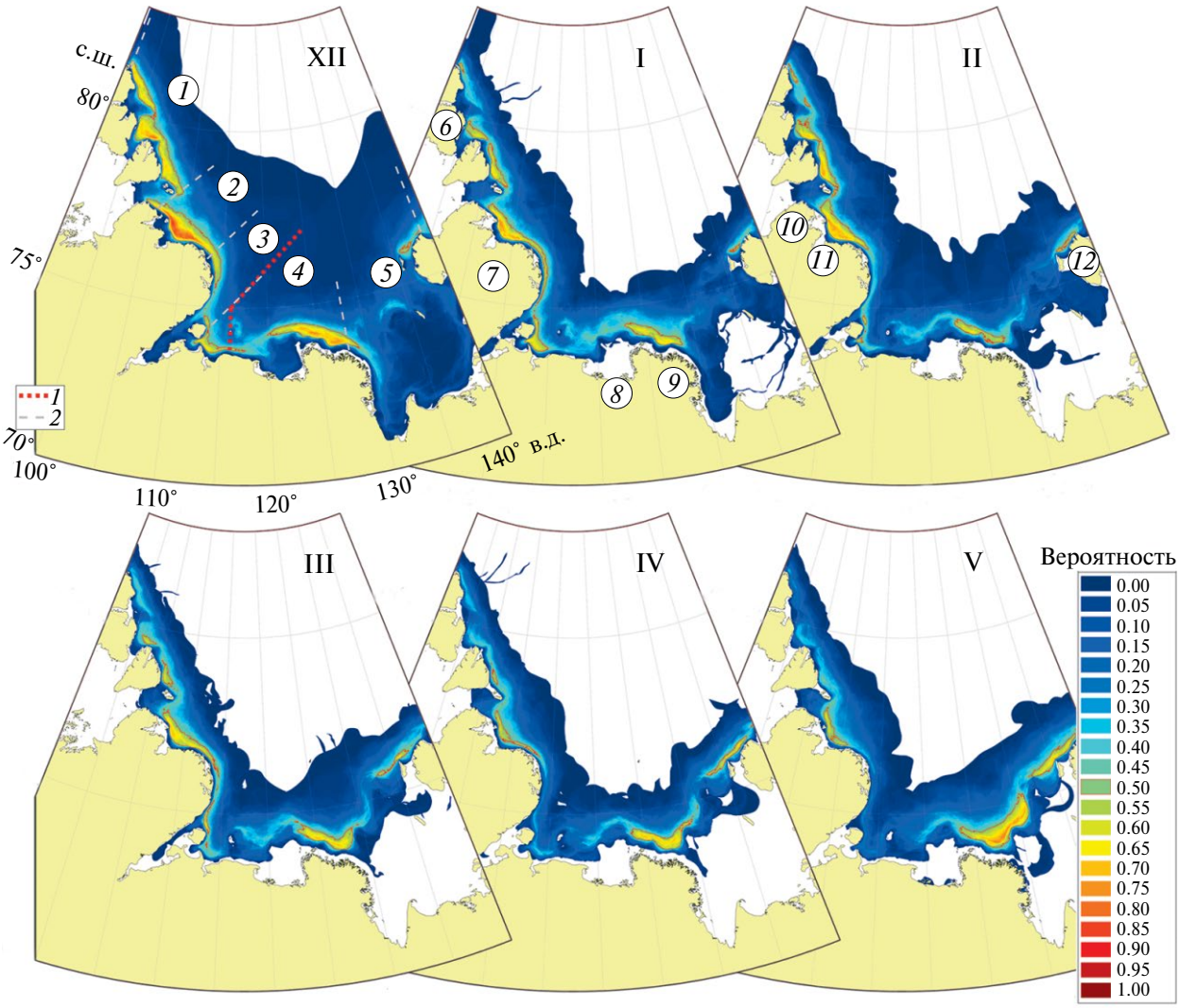

Рис. 1. Сезонный ход с декабря (XII) по май (V) пространственного распределения вероятности появления полыней в море Лаптевых. Границы и названия полыней, географические объекты: *1* – Восточная Североземельская (ВСЗ), *2* – Северо-Восточная Таймырская (СВТ), *3* – Восточная Таймырская (ВТ), *4* – Анабаро-Ленская (АН), *5* – Западная Новосибирская (ЗН), *6* – архипелаг Северная Земля, *7* – полуостров Таймыр, *8* – Оленёкский залив, *9* – дельта р. Лена, *10* – залив Терезы Клавенес, *11* – залив Фаддея, *12* – о. Котельный архипелага Новосибирские острова

Fig. 1. The seasonal variations from December (XII) to May (V) of the spatial distribution polynyas occurrence frequency in the Laptev Sea. Borders and names of polynyas, geographical objects: *1* – Eastern Severozemelskaya (ESZ), *2* – Northeastern Taymyrskaya (NET), *3* – Eastern Taymyrskaya (ET), *4* – Anabar-Lena (AL), *5* – Western Novosibirsk (WN), *6* – Severnaya Zemlya Archipelago, 7 –Taymyr peninsula, *8* – Olenek Bay, *9* – Lena River delta, *10* – Teresa Klavenes Bay, *11* – Faddey Bay, *12* – Kotelny Island of the Novosibirsk Islands archipelago

всё побережье на отдельные смежные участки. Таким образом, каждая полынья рассматривалась как пространство чистой воды и молодых льдов, находящееся в пределах конкретных створов между кромкой припая и сплочёнными дрейфующими льдами. Створы, внутри которых определена полынья, заданы исходно, при этом непостоянны обе естественные границы полыньи – и кромка припая, и граница дрейфующих льдов. Поэтому следует принимать во внимание изменение расположения полыньи в пространстве. При этом выделение полыньи происходило вне зависимости от её формальной географической границы внутри створов. При традиционном рассмотрении длины и ширины полыньи также не учитывается тот факт, что форма полыньи всегда отлична от прямоугольной. С развитием спутниковых методов исследования Земли появились новые возможности отслеживания изменения границ полыней, численные оценки повторяемости появления полыней, основанные на анализе спутниковой информации, сгруппированной в узлах сеточной области (Comiso, 2012).

Отмечено, что створы, внутри которых определено расположение конкретных полыней, установлены на базе анализа ледового режима середины – второй половины XX века, в то время как ледовая обстановка в последние десятилетия претерпевает серьёзные климатические изменения. В их числе значительное уменьшение площади арктического морского льда во все сезоны года (Comiso, 2012; Serreze et al., 2016; Petty et al., 2018), смещение сроков начала ледообразования, изменения возрастного состава льда (Егоров, Павлова, 2019; Егоров, 2020), изменения толщины льда и площади припая (Тимофеева и др., 2023).

В работе предлагается более точный и рациональный подход выделения и оценки полыней на основе полигонов, что позволяет рассмотреть данные о длине, ширине и площади заприпайной полыньи в привязке к её непосредственному расположению в море. Предложенный метод выделения заприпайных полыней на основе полигонов позволяет определять качественные (повторяемость) и количественные (площадь, положение в пространстве) характеристики заприпайных полыней с большой точностью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Электронные ледовые карты. В работе использовались региональные ледовые карты моря Лаптевых, составленные в ААНИИ на основе спутниковой информации. Еженедельные карты доступны в электронном каталоге Мирового центра данных по морскому льду (http://wdc.aari.ru/datasets/d0004) начиная с 1997 г. Региональные карты разрабатываются с использованием системы ArcGIS и представляют собой результат анализа спутниковой информации за 2–3 суток (Афанасьева и др., 2019). Экспертами выделяются однородные ледовые зоны, границы выделенных зон преобразуются в полигональные объекты в виде векторного файла, структура атрибутивной таблицы приводится к стандарту BMO SIGRID-3 (JCOMM Technical Report, 2014), при этом структура формирования зон с разной сплочённостью и различными градациями возраста льда регламентируются Номенклатурой (World Meteorological Organization, 2014).

Ледовый режим моря Лаптевых сильно различается в его восточной и западной частях, поэтому обычно для анализа используется региональное разделение, граница обычно проводится по меридиану 125° в. д. (Визе, 1948; Думанская, 2017). Однако данное разделение, уместное при рассмотрении как крупномасштабных процессов во всей акватории Северного Ледовитого океана (далее СЛО), так и региональных режимных процессов в самом море Лаптевых, представляется не вполне логичным при рассмотрении заприпайных полыней. Это связано с тем, что принятая граница делит одну из наиболее продуктивных полыней, Анабаро-Ленскую, на две части, что затрудняет решение поставленных в нашем исследовании задач. Поэтому Анабаро-Ленская полынья была включена в состав восточной части моря Лаптевых, для чего использовалось следующее разделение на западную и восточную части: граница проходит по меридиану 116° в.д. от побережья до широты 75° с.ш., севернее этой параллели линия раздела направлена на северо-восток до 125° в.д. (см. рис. 1).

Географическое разделение полыней, их номенклатура в море Лаптевых использована в соответствие с предыдущими исследованиями, в частности Карелин, Карклин, 2012, где подробно проанализированы данные за 1980–2009 гг. Отмечено, что исходные данные и методические принципы в работах различаются, величины площади полыней, приведённые в данном исследовании, сопоставимы со значениями, полученными ранее.

Выделение полигонов полыней. В качестве полыней из ледовых карт формата SIGRID-3 выделялись только ледовые зоны с преобладанием чистой воды или льда следующих возрастных градаций: начальные льды, нилас, серый и серо-белый лёд, что соответствует толщине льда до 30 см. При объединении всех ледовых зон, отвечающих условию существования полыней, мы можем получить новый полигональный объект – полигон полыньи. В зоны полыньи попадали полигоны, в которых суммарная сплочённость указанных выше возрастных градаций льда составляла не менее 7 баллов, а также зоны, в которых сплочённость льда любого возраста составляла менее трёх

баллов (Бородачев и др., 1994*)*. Для каждой ледовой карты моря Лаптевых из архива данных Мирового центра данных были получены полигоны полыней и оценены их площади за период с 1997 по 2023 г. Все выделенные зоны были визуально проверены ледовым экспертом для исключения случайных или системных ошибок.

Вероятность пересечения полигонов. Для оценки пространственно-временно́й изменчивости положения полыней может быть использован метод расчёта вероятности пересечений полигонов, предложенный в работе (Май и др., 2022). Этот метод основан на рекурсивном пересчёте полигонов вероятностей пересечений при последовательном добавлении в выборку новых исходных полигонов. Этот алгоритм можно описать следующим образом. Полигон вероятности пресечений $Q_{1/N}$ будет увеличиваться за счёт объединения с добавленным в выборку полигоном P_n: $Q_{1/N} = Q_{1/N} \cup P_n$, результат пресечения этих полигонов $R = Q_{1/N} \cap \mathrm{P}_n$ будет использоваться для расширения следующего полигона вероятности пересечений: $Q_{2/N} = Q_{2/N} \cup R$. Новый результат пересечения $R = Q_{2/N} \cap \mathrm{P}_n$ будет использоваться для коррекции следующего полигона вероятности пересечений $Q_{3/N}$ и т.д. Введя индекс k, который будет показывать количество повторений операций объединения и пересечения полигонов при данном числе проанализированных полигонов n, можно описанный алгоритм записать в виде формул:

$$Q_{n/N}^{\mathrm{k}} = Q_{n/N}^{\mathrm{k}-1} \cup R^{\mathrm{k}}$$

$$R^{\mathrm{k}} = Q_{n/N}^{\mathrm{k}-1} \cap R^{\mathrm{k}-1}$$

где k = 1...n, при k = 1 полигон пересечений R будет равен добавляемому полигону P ($R^0 = P_n$), а полигон вероятностей пересечений Q равен пустому множеству ($Q_{n/N}^0 = \varnothing$). Алгоритм расчёта вероятности пересечений полигонов по формуле можно найти по адресу https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/99879-probability-of-polygons-intersection.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности сезонного хода развития полыней проанализированы на основе полученных карт полигонов пространственной повторяемости в море Лаптевых с 1997 по 2023 г. На рис. 1 показано ежемесячное наиболее вероятное развитие полыньи, полученное при пересечении всех полигонов конкретного месяца за все годы исследуемого периода. Полученные карты вероятности приведены по месяцам за зимний период с декабря по май. Пространственная повторяемость полыней маркируется цветом в зависимости от густоты пересечений полигонов: от тёмно-синего для единичных случаев до тёмно-красного для максимального количества случаев за период исследования. Отдельно красной линией выделены акватории, которым соответствует положение полыньи, наблюдавшееся в 50% всех случаев (медианный полигон).

После начала ледообразования, которое в последние десятилетия чаще всего происходит не раньше конца октября, наблюдается постепенное становление и нарастание припая. Формирование припая продолжается весь зимний период и достигает своего максимального развития к марту–апрелю, наиболее обширную площадь припай занимает в восточной мелководной части моря (Думанская, 2017). Заприпайные полыньи за счёт устойчивых отжимных ветров начинают формироваться также с начала зимнего периода. При этом, поскольку преобладающие направления и сила (скорость) ветра не постоянны, в ходе зимнего сезона существует изменчивость открывающихся (и закрывающихся) полыней и их площади. Тем не менее многолетний ветровой режим позволяет отследить общие особенности в изменчивости полыней в ходе зимнего периода.

В работе (Карелин, Карклин, 2012) полыньи рассматривались, начиная с ноября (анализировались данные за 1980–2009 гг.). Однако устойчивое ледообразование в последние десятилетия начинается значительно позже (Егоров, Павлова, 2019), смещаются сроки перехода льдов из одной возрастной градации в другую. Зачастую в ноябре почти всё море охвачено ещё начальными и молодыми льдами, что по формальному признаку автоматизированным алгоритмом воспринимается как обширный полигон полыньи, что не соответствует действительности. По этой причине ноябрь был исключён из рассмотрения.

В декабре (см. рис. 1), выделяются обширные зоны, трактуемые алгоритмом в качестве полыньи, но на самом деле отображающие полигоны, соответствующие затянувшемуся ледообразованию и демонстрирующие отложенный переход льда в следующую возрастную градацию. Полигоны с достаточно высокой повторяемостью (до 50%) выделяются на некотором смещении в направлении моря от зон с наибольшим количеством пересечений полигонов (свыше 50%). Это, вероятно, демонстрирует случаи формирования полыней за более обширной полосой припая, что отмечалось в нескольких случаях исследуемого ряда наблюдений в конце 1990-х годов, когда было характерно более быстрое становление припая.

В целом в декабре зоны с вероятностью появления полыней свыше 50% также достаточно обширны (≈ 36 тыс. км^2). Вероятно, это связано с тем, что в этот период лёд ещё достаточно

тонкий, легко смещается под ветровым воздействием, открывая и освобождая более обширные пространства чистой воды, которые быстро покрываются начальными видами льда. В предыдущие десятилетия в западной части моря к окончанию периода таяния всегда сохранялось значительное количество остаточного льда (Таймырский ледяной массив). После начала ледообразования остаточный лёд не давал возможности открываться обширным полыньям. Однако в последние годы Таймырский ледяной массив значительно вытаивает, остаточный лёд может практически отсутствовать, а вновь образованный лёд гораздо легче смещается под ветровым воздействием, открывая более обширные полыньи.

В декабре пространственное распределение полыней с высокой повторяемостью, (преимущественно 50–75%, на отдельных участках до 80%) в большей степени соответствует западной части моря. В номенклатуре, принятой в предыдущих исследованиях (Карелин, Карклин, 2012), их можно отнести к Восточной Североземельской (ВСЗ), Северо-Восточной Таймырской (СВТ), обладающей в этот месяц наиболее обширной зоной с повторяемостью 70–85%, Восточной Таймырской (ВТ), а также Анабаро-Ленской (АЛ) полыньям. АЛ полынья в данном исследовании отнесена к восточной части моря. Повторяемость других полыней в восточной части моря в декабре довольно низкая, открывается только небольшой участок Восточной Новосибирской полыньи (ВН) над о. Котельный (30–40% случаев).

В январе все указанные полыньи сохраняются с высокой степенью повторяемости, однако с гораздо меньшей площадью. Этот факт, очевидно, указывает на постепенное нарастание толщины дрейфующих льдов, что препятствует открытию больших площадей чистой воды или разреженного льда. Также происходит довольно быстрый переход в возрастные градации, которые не попадают под условия выделения полыньи. Отмечаются единичные случаи обширных акваторий, покрытых начальными и молодыми льдами, включёнными автоматическим алгоритмом в состав полигона полыньи, что также может быть объяснено сильно затянувшимся ледообразованием в отдельные годы последнего десятилетия. В целом, в январе не наблюдается зон полыней с повторяемостью свыше 70%, кроме СВТ.

В феврале пространственное положение полыней с наибольшей повторяемостью в целом не претерпевает серьёзных изменений по сравнению с предыдущими месяцами. Наибольшей повторяемостью по-прежнему обладают полыньи западной части моря. Особенности распределения полыней этого месяца заключаются в относительно слабом развитии сектора ВТ полыньи, при сохранении полыньями СВТ и ВСЗ наибольшей площади и повторяемости 50–75%. С повторяемостью преимущественно до 20%, на некоторых участках до 40%, выделяются полыньи в восточной части моря вдоль кромки сформировавшегося к этому времени припая.

В марте в пространственном распределении полыней начинают проявляться зачатки последующих изменений. Наблюдается уменьшение площади и повторяемости ВСЗ полыньи до 40–55%, обширную площадь и большую повторяемость сохраняют СВТ и АЛ полыньи. В восточной части моря расширяется зона с повторяемостью 35–40% вдоль границы развитого припая. При этом стабильно наблюдавшийся над о. Котельный в предыдущие месяцы сектор ВН полыньи с повторяемостью 40–50% смещается в западном направлении, занимая в марте положение над кромкой припая и островом Столбовой.

В апреле пространственное распределение полыней начитает претерпевать изменения. Заметно увеличение площади и повторяемости полыней в восточной части моря. Хорошо развита АЛ полынья, к ней относится наибольшая зона с повторяемостью более 50% в этом месяце. ВН полынья постепенно приобретает черты, широко описанные в литературе (Купецкий, 1959; Захаров, 1966; Бородачев и др., 1994, Карелин, Карклин, 2012; Думанская, 2017), протягиваясь вдоль кромки припая восточной части моря Лаптевых. В отдельных случаях наблюдается полынья вдоль кромки припая, занимающего площадь менее своего среднемноголетнего положения. Зоны полыней с высокой повторяемостью в западной части моря сохраняются, но постепенно затухают.

Для пространственного распределения полыней в мае характерно преобладание полыней в восточной части моря. В сегменте АЛ и ВН полыней наблюдается наибольшая площадь и повторяемость (на некоторых участках до 80%). Конфигурация сегментов полыней с высокой повторяемостью соответствует классическому пониманию дрейфа льдов в СЛО: основным источником льдов, вовлекаемых в Трансарктический дрейф за счёт выноса, являются полыньи восточной части моря Лаптевых совместно с западной частью Восточно-Сибирского моря (Горбунов и др., 1979). В западной части моря в мае полыньи угнетаются, повторяемость снижается до 20–40%, только в пределах СВТ полыньи сохраняется сегмент с повторяемостью свыше 50%.

При рассмотрении сезонного, от месяца к месяцу, хода заметно смещение локализации активного процесса открытия полыней, что связано со сменой направления преобладающих воздушных переносов. В зимний период, с октября по март, море Лаптевых находится под влиянием двух центров действия атмосферы: исландского минимума

атмосферного давления и азиатского максимума, в то же время юго-восточная часть моря находится под влиянием отрога сибирского максимума. Поля давления распределяются таким образом, что происходит развитие зимнего муссона. В апреле происходит смена атмосферной циркуляции: место Сибирского антициклона занимает неглубокая депрессия, и, наоборот, вместо ложбины исландской депрессии образуется зона повышенного давления. Таким образом, барические градиенты уменьшаются и приобретают обратное направление, вследствие чего получает развитие летний муссон (Крутских, Лагутин, 1986).

Такая особенность атмосферной циркуляции хорошо отражается и на режиме образования полыней. Для анализа количественных изменений площади полыньи в ходе зимнего сезона и оценки режимных особенностей западной и восточной частей моря использовался такой показатель как площадь медианного полигона $Q_{0.5}$ пересечений полигонов полыней. Фактически это означает, что была рассчитана площадь акватории, на которой наблюдалась полынья в 50% случаев за исследуемый период времени. Медианный полигон $Q_{0.5}$ соответствует устойчивой полынье по классификации (Карелин, Карклин, 2012), но с учётом её пространственного положения. Такой показатель представляется более информативным и корректным для анализа, чем среднемесячные значения площади, поскольку в осреднение попадают количественные «выбросы», получающиеся из-за включения в полигон полыньи обширных областей начальных и молодых льдов открытого моря. На рис. 2 приведён сезонный ход этого показателя для западной и восточной частей моря. Отчётливо видно, что в первой половине сезона преимущественно открываются и имеют большую площадь полыньи западной части моря, затем происходит перестройка крупномасштабных атмосферных процессов, и в весенний период возрастает площадь полыней восточной части моря, максимально в мае до ≈15 тыс. км^2. При этом в весенние месяцы полыньи западной части моря развиты на минимальном за весь зимний сезон уровне, тогда как в декабре они обладают наибольшей в годовом цикле площадью ≈27 тыс. км^2.

Основные статистические характеристики за рассматриваемый период с 1997 по 2023 г. приведены в таблице. Значения площади полыньи были рассчитаны для каждой декады сезонного хода с декабря по май, однако для представления в таблице они были осреднены по месяцам. Подекадные изменения площадей полыней за каждый год исследуемого периода представлены на рис. 3.

Наибольшая межгодовая изменчивость фиксируется в начале сезона, в декабре, которому соответствуют наибольшие значения размаха

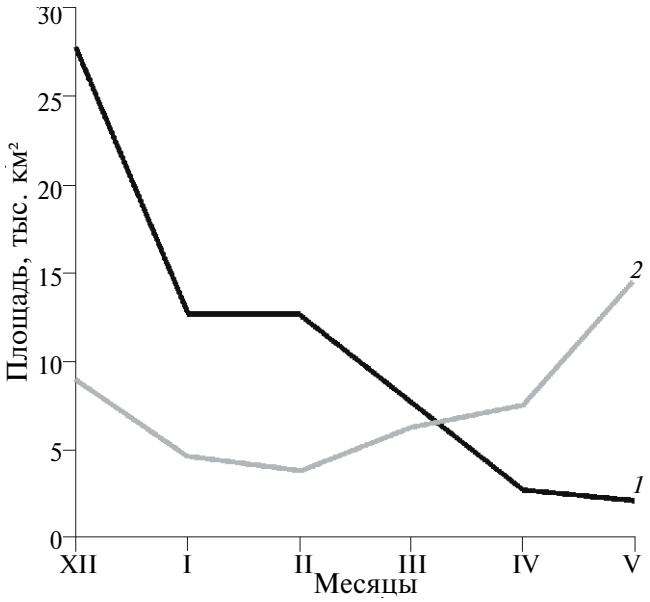

Рис. 2. Сезонный ход площади устойчивых заприпайных полыней (повторяемость 50%) в восточной и западной частях моря Лаптевых. *1* – западная часть моря, *2* – восточная часть моря

Fig. 2. The seasonal variation of the flaw stable polynyas areas (with an occurrence frequency of 50%) in the eastern and western parts of the Laptev Sea. *1* – the western part of the sea, *2* – the eastern part of the sea

колебаний и среднеквадратического отклонения (СКО). Однако это, как уже отмечалось, вероятно, связано с затяжным ледообразованием и со спецификой (несовершенством) работы автоматического алгоритма идентификации полыньи, который присчитывает все обширные зоны начального и молодого льда в море к площадям полыньи. Эти значения некорректно рассматривать как площадь полыньи, поскольку фактически они ей не являются. Так, максимальное значение площади полыньи, полученное при расчёте автоматизированным алгоритмом, отмечено в декабре 2020 г. (см. рис. 3), однако в этот год на акватории моря наблюдалось позднее ледообразование и медленный переход льда в следующую возрастную градацию. Самое низкое значение СКО приходится на апрель, что характерно и для обеих частей моря, и для моря в целом.

Именно из-за некорректности подобной оценки был введён новый показатель – площадь устойчивой полыньи, т.е. площадь акватории, на которой наблюдалась полынья в 50% случаев в каждый конкретный месяц. Полученный показатель площади полыньи с повторяемостью 50% в несколько раз меньше соответствующего ему среднемесячного значения. Это демонстрирует значительный разброс по пространственному положению и конфигурации полыньей в разные годы, однако

Таблица. Статистические характеристики сезонного изменения площади полыней моря Лаптевых, тыс. км^2

Показатели	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
			всё море			
Среднее	89.5	55.4	52.3	47.7	39.4	43.3
Максимум	344.7	120.9	170.7	90.3	96.8	98.8
Минимум	32.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Размах	312.2	120.9	170.7	90.3	96.8	98.8
СКО	65.5	28.0	33.6	23.5	22.0	25.7
Площадь $Q_{0.5}$	36.7	17.3	16.5	14	10.2	16.7
			запад			
Среднее	47.7	30.0	28.8	23.7	17.3	15.1
Максимум	152.8	66.5	84.7	48.9	52.7	46.8
Минимум	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Размах	147.0	66.5	84.7	48.9	52.7	46.8
СКО	33.8	18.5	19.1	14.7	14.3	14.9
Площадь $Q_{0.5}$	27.8	12.7	12.7	7.7	2.7	2.1
			восток			
Среднее	41.8	25.3	23.4	24.0	22.0	28.2
Максимум	191.7	55.3	136.4	74.9	46.9	63.3
Минимум	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Размах	180.8	55.3	136.4	74.9	46.9	63.3
СКО	35.9	15.6	26.3	17.3	11.7	17.6
Площадь $Q_{0.5}$	8.9	4.6	3.8	6.3	7.5	14.6

$Q_{0.5}$ – полигон устойчивой полыньи.

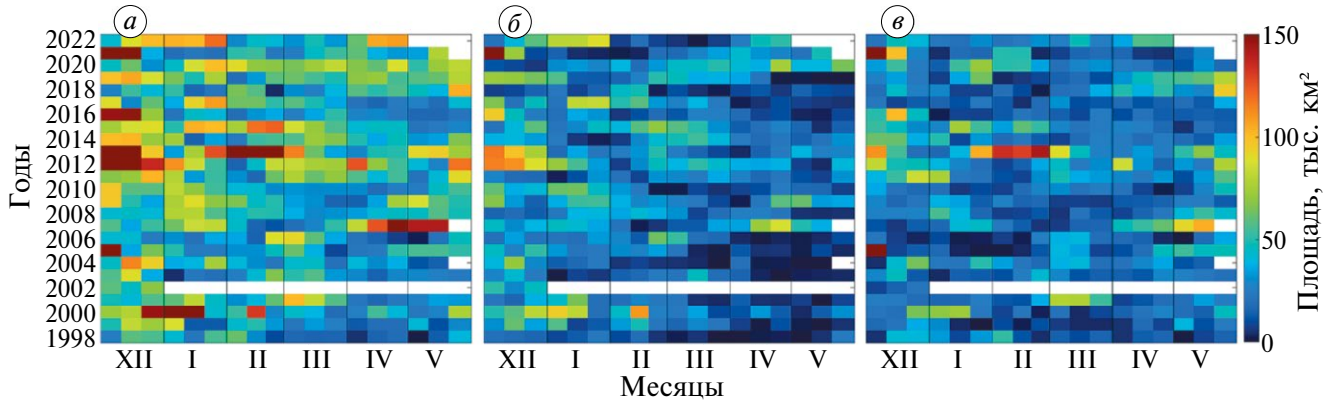

Рис. 3. Подекадные изменения площади полыней моря Лаптевых с 1997 по 2023 г.
а – вся акватория моря, *б* – западная часть моря, *в* – восточная часть моря
Fig. 3. Every 10-days changes of the polynyas area in the Laptev Sea since 1997 to 2023.
а – the entire area of the sea, *б* – the western part of the sea, *в* – the eastern part of the sea

позволяет оценить устойчивость анализируемых процессов. В целом по морю наибольшая площадь полыней наблюдается в декабре (36.7 тыс. км^2), затем медленно уменьшается в течение зимы до минимума в апреле (10.2 тыс. км^2), и вновь серьёзно увеличивается в мае (16.7 тыс. км^2).

Если исключить из рассмотрения период, близкий к началу ледообразования (декабрь) и потому способный влиять на количественную оценку площадей, то за весь ряд наблюдений есть всего несколько количественных «выбросов» свыше 130 тыс. км^2 (см. рис. 3). Непродолжительные выбросы отмечались в январе и феврале сезона 1999/00 г. (за счёт развития обширных полыней преимущественно в западной части моря) и в апреле–мае сезона 2006/07 г. (за счёт развития обширных полыней в обеих частях моря). Кроме того, одна декада апреля в 2011/12 г. (за счёт полыней восточной части моря), конец января – начало марта сезона 2012/13 г. (за счёт полыней восточной части моря с наибольшей локализацией в районе АЛ и ВН секторов полыней) и две декады февраля сезона 2014/15 г. (за счёт развития обширных полыней в обеих частях моря) могут быть отнесены к выбросам.

По данным рис. 3 видно, что в конце 1990-х и начале 2000-х годов развитие полыней во второй половине зимнего периода и весной весьма слабое, их площади относительно небольшие. Постепенно с годами происходит увеличение площадей в начале сезона (декабрь–январь), а затем с 2010-х годов начинают увеличиваться площади полыней и в весенний период. При этом площади полыней свыше 100 тыс. км^2 чаще наблюдаются в первой половине зимнего сезона, до марта, тогда как в весенние месяцы такие обширные площади полыней фиксируются значительно реже.

На рис. 4 показаны карты пересечений полигонов полыней за каждый зимний сезон с декабря 1997 г. по май 2023 г., т.е. каждая отдельно взятая карта демонстрирует пересечение всех полигонов полыней, наблюдаемых в течение одного зимнего сезона. Использование такого подхода позволяет оценить пространственное и временно́е распределение полыней, отражающее их наиболее характерную локализацию за каждый конкретный зимний сезон. Рисунок за 2001/02 г. был исключён из-за недостаточности данных. На картах некоторых лет хорошо видны единичные «выбросы» при захвате алгоритмом в зоны полыней зоны затянувшегося ледообразования в осенний период (синяя заливка), это случаи с низкой вероятностью. Больше всего выделяется в этом отношении сезон 2020/21 г., когда процесс ледообразования и нарастания толщины льда в море происходил очень медленно.

На рис. 4 хорошо видно, что конфигурация наиболее повторяющихся полыней из года в год соответствует стандартной схеме. В западной части моря довольно часто ВСЗ и СВТ полыньи имеют повторяемость свыше 75% в пределах одного зимнего сезона. В восточной части моря такую высокую повторяемость можно чаще наблюдать у АЛ, чем у ВН полыньи. Однако стоит учитывать факт того, что в западной части моря припай развит слабо, и в течение всего зимнего периода его кромка мало изменяется, что позволяет полынье чаще быть локализованной в пространственно-идентичной зоне.

В конце 1990-х годов зоны с повторяемостью полыней свыше 50% в течение одного сезона достаточно узкие (выделены красным на картах). В последующие годы подобные зоны становятся более обширными в зимний период.

Межгодовое изменение площади устойчивых и стационарных полыней (т.е. площади, где 50 и 75% времени наблюдалась полынья в ходе отдельно взятого зимнего сезона) представлена на рис. 5. Наибольшая площадь с 50%-й вероятностью отмечена в сезон 2012/13 г. (свыше 70 тыс. км^2), немногим меньше в 2011/12 г. (около 63 тыс. км^2). В среднем площадь устойчивых полыней составляет 30–40 тыс. км^2, наименьшее значение (около 7 тыс. км^2) отмечается в сезон 1997/98 г. На графике изменения площади полыней с повторяемостью 75% (см. рис. 5) максимальные значения отмечаются в 2012, 2013, 2015 и 2020 гг. Зимний сезон 2019/20 г. выделялся аномальными характеристиками циркуляции атмосферы, преобладали положительные аномалии температуры воздуха (на метеорологических станциях в районе моря Лаптевых аномалия составила 4.4 °C) (Обзор..., 2021).

Изменение площади устойчивых полыней демонстрирует положительный межгодовой тренд, составляющий 0.9859 тыс. км^2/год. Статистически тренд значим при уровне значимости 5% и выше; при уровне 1% тренд не значим. Аналогичная оценка для повторяемости стационарных полыней ($p = 0.75$) демонстрирует тренд 0.2713 тыс. км^2/ год. Тренд значим только при уровне значимости 10%, при уровне 5 и 1% тренд не значим.

Для понимания, какая часть моря и какой временно́й отрезок сезонного хода вносят в этот тренд наибольший вклад, была оценена межгодовая изменчивость площади полыней осреднённой за каждые два месяца сезонного хода: декабрь-январь, февраль-март, апрель-май. В целом положительный тренд присутствует для полыней всего моря во всех отрезках сезонного хода. Однако в большинстве случаев полученные коэффициенты линейного тренда статистически незначимы. В начале зимнего периода в положительный тренд больший вклад вносят изменения в восточной части моря.

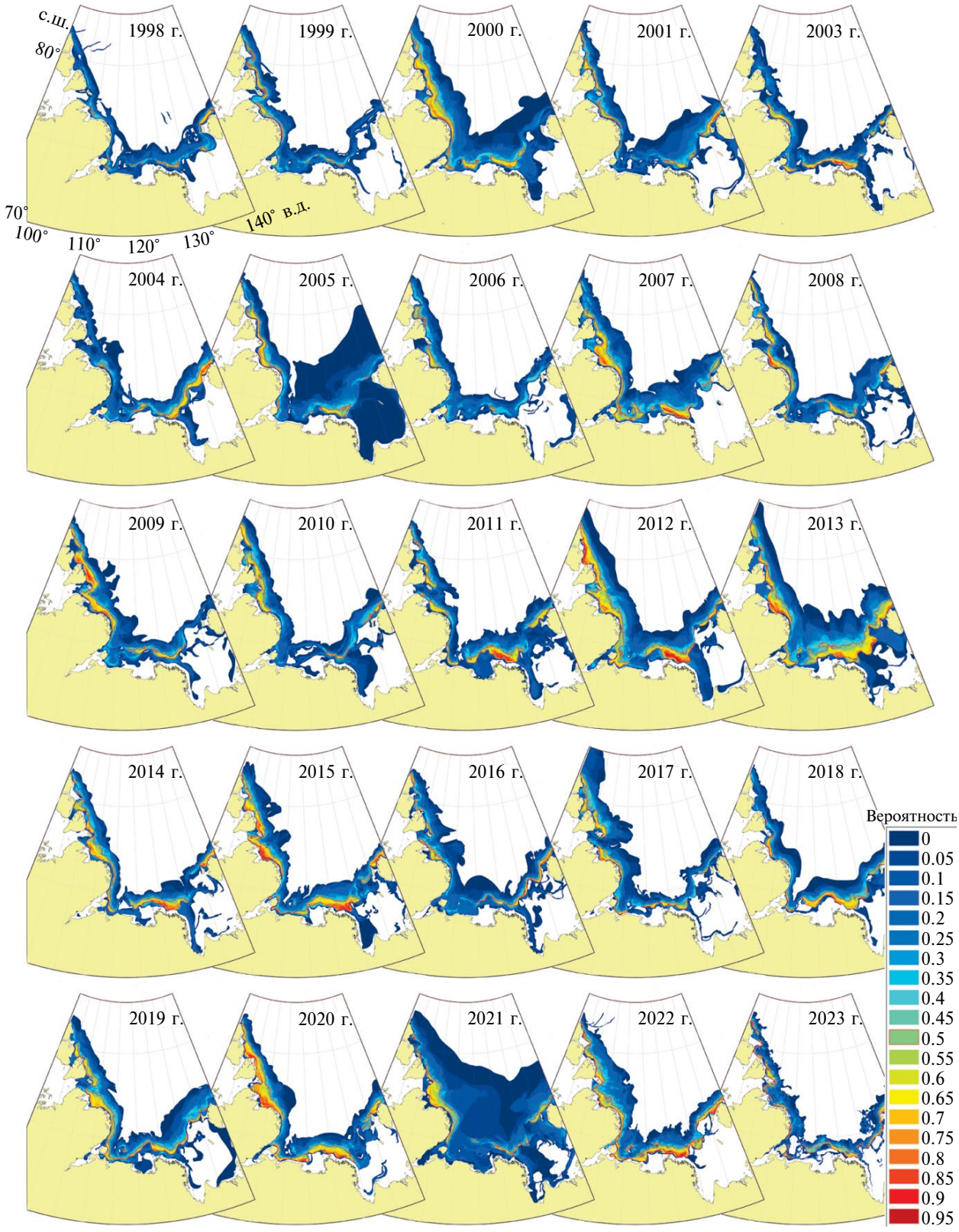

Рис. 4. Ежегодная вероятность присутствия полыней за зимний сезон (декабрь–май) с 1997 по 2023 г. в море Лаптевых

Fig. 4. The annual occurrence frequency of the polynyas presence during the winter season (December–May) since 1997 to 2023 in the Laptev Sea

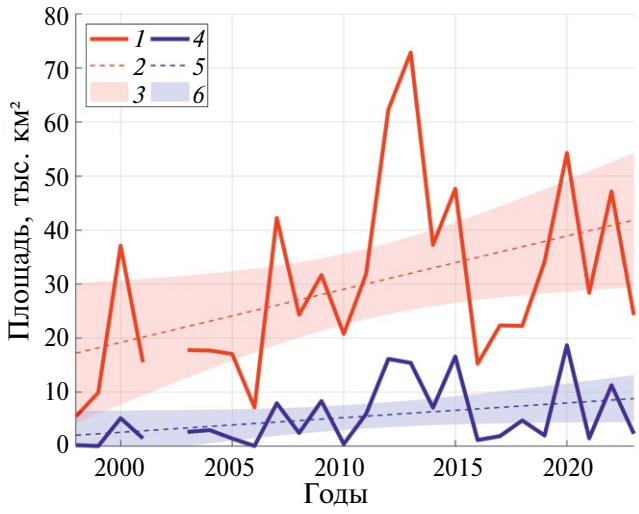

Рис. 5. Межгодовое изменение площади устойчивых (повторяемость 50%) и стационарных полыней (повторяемость 75%) в море Лаптевых с 1997 по 2023 г.

1 – изменение площади устойчивых полыней; *2* – линейный тренд изменения площади устойчивых полыней; *3* – границы 95% доверительного интервала тренда изменения площади устойчивых полыней; *4* – изменение площади стационарных полыней; *5* – линейный тренд изменения площади стационарных полыней; *6* – границы 95% доверительного интервала тренда изменения площади стационарных полыней

Fig. 5. Interannual change in the area of stable (repeatability of 50%) and stationary polynyas (repeatability of 75%) in the Laptev Sea from 1997 to 2023.

1 – change in the area of stable polynyas; *2* – linear trend in the area of stable polynyas; *3* – boundaries of the 95% confidence interval of the trend in the area of stable polynyas, *4* – change in the area of stationary polynyas, *5* – linear trend in the area of stationary polynyas; *6* – boundaries of the 95% confidence interval of the trend in the area of stationary polynyas

В середине зимы наблюдается рост площади полыней в обеих частях моря, при этом чуть больше в западной, чем в восточной.

В весенний период выявлен значимый тренд в увеличении площади полыней в западной части моря. Это важное обстоятельство, поскольку в апреле–мае полынья служит очагом начинающегося процесса летнего таяния. По наблюдениям с 1938 г. восточная часть моря очищается быстрее, лёд Янского ледяного массива полностью разрушается за летний период в 85% случаев. Таймырский ледяной массив обычно сохраняется в западной части моря на 45% акватории к моменту окончании таяния. В последние десятилетия очищение происходит быстрее, а площадь, покрытая льдом, уменьшается (в среднем около 10% в последнее десятилетие). Предшествующий процесс раннего открытия (апрель-май) обширной полыньи в западной части моря не может не оказывать влияние на дальнейший ход процессов в летний период, способствуя более быстрому и более обширному разрушению ледяного покрова.

Как результат пересечения полигонов полыней за холодный отрезок времени за все годы исследуемого периода (1997–2023 гг.) получен набор областей полыней с разной повторяемостью (рис. 6). На рисунке выделены области с повторяемостью 0.5 и 0.75, которые в данном контексте стоит рассматривать как границы устойчивых и стационарных полыней.

Ориентируясь на классическую номенклатуру, критерию устойчивых полыней (повторяемость свыше 50%) соответствуют области, приходящиеся на полыньи: ВСЗ (выделяется два участка), СВТ, АЛ, а также ЗН. Наиболее крупными из этих областей являются участки СВТ и АЛ полыней, наименьшей – ЗН, локализация которой, в противовес классическому пониманию как протяжённой вдоль кромки припая восточной части моря, располагается узкой полоской к северо-западу от о. Котельный. При этом критерию повторяемости свыше 75% соответствует только участок СВТ полыньи вдоль припая заливов Терезы Клавенс и Фаддея.

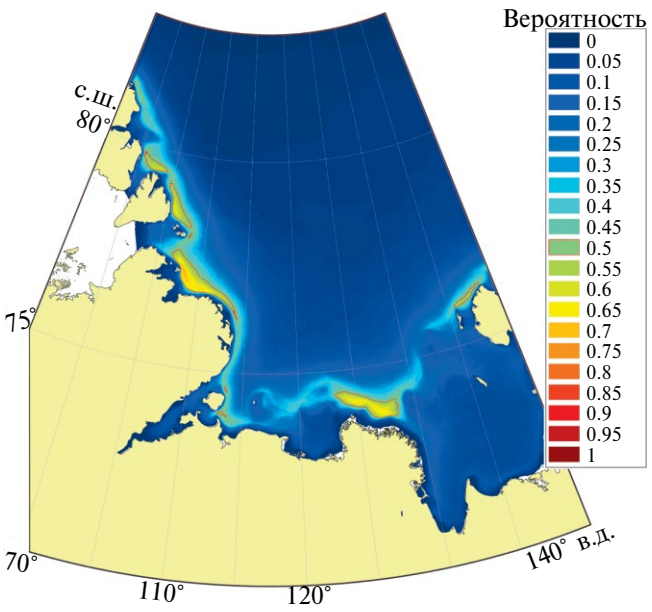

Рис. 6. Пространственно-временна́я повторяемость полыней в море Лаптевых с 1997 по 2023 г.

Fig. 6. Spatial and temporal occurrence frequency of polynyas in the Laptev Sea since 1997 to 2023

Отмечено, что в исследовании в качестве основного инструмента используется алгоритм расчёта вероятностей пересечения полигонов полыней, т.е. учитывается одновременно пространственная и временна́я повторяемость. В предыдущих исследованиях для описания полыньи использовались створы, а для оценки их вероятностных характеристик учитывались все полыньи, фиксирующиеся в пределах этих створов, вне зависимости от их пространственного смещения и без учёта наложений, т.е. рассчитывалась только повторяемость во времени.

При этом, неучтённая в работах (Купецкий, 1959; Захаров, 1966; Карелин, Карклин, 2012) пространственная изменчивость положения полыньи может существенно исказить результаты. Так, например, в восточной части моря Лаптевых формируется обширный припай. В связи с климатическими изменениями его становление в последнее десятилетие может происходить медленнее, отдельные участки могут прирастать позже обычного, конфигурация его кромки в ходе зимы может серьёзно меняться и быть нестабильной, в том числе из-за случаев частичных взломов (Timofeeva et al., 2024). Непостоянство границы припая приводит к постоянному смещению зоны полыньи в ходе одного сезона, что может объяснить тот факт, что на полученных картах зоны с высокой повторяемостью ВН полыньи в восточной части моря могут быть несколько «размыты». Тем не менее это достаточно неожиданный результат, поскольку отсутствие выраженной пространственной стационарности ВН полыньи идёт вразрез с классическим пониманием Великой Сибирской полыньи. Возможно, при выборе менее жёсткого критерия (например, более высокая сплочённость) в использованном автоматизированном алгоритме выделения полыньи результат может быть другим. Либо угнетение Великой Сибирской полыньи обуславливается современными климатическими условиями.

Согласно исследованию (Карелин, Карклин, 2012), из пяти полыней моря Лаптевых только две относятся к стационарным: АЛ и ЗН, и обе входят в состав Великой Сибирской полыньи. Однако даже при заметной миграции полыньи в зависимости от локализации, изменяющейся в разные годы кромки припая, очевидно, что ЗН полынья развита слабо и в последние десятилетия не обладает столь же значительной повторяемостью.

В то же время, СВТ полынья, отмечаемая авторами (Карелин, Карклин, 2012) как одна из самых небольших полыней арктических морей, образуемая за счёт отжимных западных ветров, по результатам данного исследования имеет наибольшую площадь области с повторяемостью свыше 50%, и единственную среди полыней моря Лаптевых зону с повторяемостью, близкой к 75%.

В целом полыньи в западной части моря кажутся более развитыми в последние десятилетия, что может быть связано с изменением крупномасштабной атмосферной циркуляции и преобладанием западных форм циркуляции с высокоширотными траекториями циклонов, интенсивно проникающих в полярную область с Атлантики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнена оценка пространственно-временно́й стационарности положения полыней с использованием метода расчёта вероятности пересечений векторных полигонов. Исходными данными служат региональные ледовые карты электронного архива ААНИИ в формате SIGRID-3 (JCOMM Technical Report, 2014). Используемый подход выделения и оценки полыней на основе полигонов позволяет рассмотреть данные о длине, ширине и площади более точно и рационально, в привязке к непосредственному географическому расположению полыньи в море. По рассчитанным площадям полыней возможна оценка статистических характеристик потоков тепла из океана в атмосферу через полыньи, объёмов льда и плотных вод, формирующихся в полыньях, что важно для определения изменчивости потоков энергии и массы в исследуемом регионе.

Для каждого месяца с декабря по май определены области, где в 50% случаев за период с 1997 по 2023 г. наблюдалась полынья. Такая информация может быть полезна при стратегическом планировании навигации в зимний период в море Лаптевых.

Выявлена особенность сезонного хода открытия полыней в западной и восточной частях моря: отчётливо видно, что в первой половине сезона, как правило, чаще открываются и имеют большую площадь полыньи западной части моря. Затем происходит перестройка крупномасштабных атмосферных процессов, оказывающих непосредственное влияние на образование полыней, и в весенний период возрастает площадь полыней восточной части моря.

В целом заметно, что с конца 1990-х – начала 2000-х годов площадь полыньи увеличивается в начале сезона (декабрь, январь), что свидетельствует о запаздывании начала ледообразования в море, а также о более медленном нарастании толщины льда и переходе его в следующую возрастную градацию. С 2010-х годов начинают увеличиваться площади полыней и в весенний период.

Наиболее информативным представляется показатель площади, занимаемой полыньёй 50% времени одного зимнего сезона, поскольку он

нивелирует случайные «выбросы», появляющиеся за счёт учёта случаев затянувшегося ледообразования. Межгодовое изменение площади устойчивых полыней демонстрирует положительный тренд, статистически значимый при уровне значимости 5% и выше. Использованный алгоритм позволяет выделять области наибольшей повторяемости полыньи, которые можно рассматривать в качестве так называемого ядра полыньи.

При рассмотрении временно́го ряда отдельно для западной и восточной частей моря, а также для разных отрезков сезонного хода выявлен статистически незначимый положительный тренд, присутствующий для полыней обеих частей моря в ходе всего сезона. Только в весенний период (апрель–май) выявлен значимый положительный тренд площади полыней в западной части моря. Это важное обстоятельство, поскольку в апреле–мае полынья служит очагом начинающегося процесса летнего таяния и может оказывать на него влияние.

В холодный период за все годы исследуемого периода (1997–2023 гг.) получены области с повторяемостью полыней 50 и 75%. Критерию устойчивых полыней соответствуют участки полыней: ВСЗ, СВТ, АЛ, а также ЗН, при этом ЗН полынья развита слабо и в последние десятилетия не обладает значительной повторяемостью, располагаясь узкой полоской к северо-западу от о. Котельный. Согласно предыдущим исследованиям ЗН полынья входит в состав Великой Сибирской полыньи. По нашим данным её развитие в последние десятилетия угнетено. В то же время весьма крупными и обладающими высокой повторяемостью являются участки СВТ и АЛ полыней. Критерию повторяемости стационарной полыньи (свыше 75%) соответствует только участок СВТ полыньи вдоль припая заливов Терезы Клавенс и Фаддея.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00039).

Acknowledgements. This study was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-19-00039.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Астахов А.С., Бабич В.В., Гуков А.Ю., Алаторцев А.В. Зимняя полынья в море Лаптевых и арктическая осцилляция в последние 300 лет: реконструкции по геохимическим данным // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 1. С. 86–92. https://doi.org/10.31857/S2686739723600406

Афанасьева Е.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Демчев Д.М., Чуфарова М.С., Быченков Ю.Д., Девятаев О.С. Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 5–20. https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10071

Бородачев В.Е., Гаврило В.П., Казанский М.М. Словарь морских ледовых терминов. Л.: Гидрометеоиздат, 1994. 127 с.

Визе В.Ю. Моря Советской Арктики. М.–Л.: Изд-во Главсевморпути, 1948. 414 с.

Горбунов Ю.А., Гудкович З.М., Аппель И.Л. Особенности дрейфа льда в юго-восточной части моря Лаптевых // ПОЛЭКС-Север-76. Ч. Н. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. С. 45–65.

Гуков А.Ю. Экосистема сибирской полыньи. М.: Научный мир, 1999. 334 с.

Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. Обнинск: Изд-во ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.

Егоров А.Г. Изменение возрастного состава и толщины зимнего ледяного покрова арктических морей России в начале XXI в. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66 № 2. С. 124–143. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143

Егоров А.Г., Павлова Е.А. Изменение сроков устойчивого ледообразования в восточных арктических морях России в начале XXI в. Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65 № 4. С. 389–404. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404

Захаров В.Ф. Роль заприпайных полыней в гидрохимическом и ледовом режиме моря Лаптевых // Океанология. 1966. Т. 24. С. 168–179.

Карелин И.Д., Карклин В.П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века. СПб.: ААНИИ, 2012. 180 с.

Крутских Б.А., Лагутин Б.Л. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 11. Море Лаптевых. Л.: Гидрометеоиздат, 1986.

Купецкий В.Н. Стационарные полыньи в замерзающих морях // Вест. АН СССР. 1959. Вып. 12. 172 с.

Май Р.И., Ганиева К.Р., Топаж А.Г., Юлин А.В. Повторяемость появления припая, вычисленная на основе анализа полигонов электронных ледовых карт (на примере Карского моря) // Криосфера Земли. 2022. Т. 26. № 5. С. 29–40.

Макштас А.П. Тепловой баланс арктических льдов в летний период. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 67 с.

Мировой центр данных по морскому льду // Электронный ресурс. http://wdc.aari.ru/datasets/d0004 Дата обращения: 06.10.2023.

Морозов Е.Г., Писарев С.В. Внутренние волны и образование полыньи в море Лаптевых // Докл. АН СССР. 2004. Т. 398. № 2 С. 255–258.

Обзор гидрометеорологических процессов в северной полярной области 2020 г. / Под ред. А.С. Макарова. ISSN 2618-6721. СПб.: ААНИИ, 2021.

Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 320 с.

Тимофеева А.Б., Шаратунова М.В., Прохорова У.В. Оценка многолетней изменчивости толщины припая в морях Российской Арктики по данным полярных станций // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. 69 (3): 310–330. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-310-330

Cavalieri D.J., Martin S. The contribution of Alaskan, Siberian, and Canadian coastal polynyas to the halocline layer of Arctic Ocean. Journ. of Geophys. Research. 1994. V. 99. No. C9. P. 18343–18362.

Comiso J.J. Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover // Journ. of Climate. 2012. V. 25. P. 1176–1193.

JCOMM Technical Report No. 23, SIGRID-3: A vector archive format for sea ice georeferenced information and data. 2014.

Fiedler E.K., Lachlan-Cope T.A., Renfrew I.A., King J.C. Convective heat transfer over thin ice covered coastal polynyas // Journ. of Geophys. Research. 2010 V. 115. C10051. https://doi.org/10.1029/2009JC005797

Kassens H., Thiede J. Climatological significance of Arctic Sea ice at present and in the past // Russian-German Cooperation in the Siberian shelf seas: geo-system Laptev-Sea. 1994. V. 144. No. 1.

Petty A.A., Stroeve J.C., Holland P.R., Boisvert L.N., Bliss A.C., Kimura N., Meier W.N. The Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows. The Cryosphere. 2018. V. 12. №. 2. P. 433–453. http://doi.org/10.5194/tc-12-433-2018

Serreze M.C., Stroeve J., Barrett A.P., Boisvert L.N. Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale // Journ. of Geophys. Reseatrch. Atmosphere. 2016. V. 121 P. 11463–11485. https://doi.org/10.1002/2016JD025161

Timofeeva A., May R., Rubchenia A. Estimation of landfast ice occurrence frequency in the Laptev Sea based on the polygons analysis of electronic ice charts // Proc. of the Thirty-fourth (2024) International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, June 16–21, 2024.

Willmes S., Adams S., Schroder D., Heinemann G. Spatio-temporal variability of polynya dynamics and ice production in the Laptev Sea between the winters of 1979/80 and 2007/08 // Polar Research. 2011. V. 30. № 5971. P. 1–16. https://doi.org/10.3402/polar.v30i0.5971

World Meteorological Organization, Sea ice Nomenclature; WMO. 2014. No. 259.

Citation: *Timofeeva A.B., Rubchenia A.V., May R.I.* Spatial and temporal stationarity of the Laptev Sea polynyas. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2025, 65 (1): 120–134. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425010092

Spatial and temporal stationarity of the Laptev Sea polynyas

© 2025 A. B. Timofeeva[a,#], A. V. Rubchenia[c], R. I. May[a,b]

[a]*Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia*
[b]*Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia*
[c]*N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russian Federation*
[#]*e-mail: tianna@aari.ru*

Received September 4, 2024; revised November 6, 2024; accepted December 25, 2024

The study examines the seasonal and interannual variability of the location and area of flaw polynyas in the Laptev Sea. It utilizes AARI regional charts of ice conditions in SIGRID-3 format covering the years 1997 to 2023 as initial data. The analysis is based on an algorithm developed previously for calculating the frequency of occurrence of multiple vector polygon intersections. As a result, monthly charts (from December to May) were created to show the spatial distribution of zones with a 50% occurrence frequency. The time series of the annual average of this indicator demonstrates a positive trend. The seasonal variations of the polynyas show a distinct pattern: in the first half of the season, the polynyas in the western part of the sea are typically open and wide. However, during spring, the extent of polynyas in the eastern part increases, while those in the western part decrease. This positive trend is observed in both parts of the sea throughout the season, with significant values noted during the spring months (April and May) in the western area. This is particularly important, as the polynya during this period marks the beginning of summer melting, which can have significant implications. By analyzing all polynas polygons from the study period (1997–2023), we identified polygons of recurring polynyas (with a 75% occurrence frequency) and stable polynyas (with a 50% occurrence frequency). It was discovered that the criterion for recurring

polynyas corresponds only to a small section along the fast ice of Teresa Klavens and Thaddeus Bays. Notably, the Western New Siberian polynya has a 50% occurrence frequency and is located in a narrow strip northwest of Kotelny Island. Previous studies indicate that this section is part of the Great Siberian Polynya; however, it is evident that its development has been limited in recent decades. In contrast, the sections of the Northern-Eastern Taimyr and Anabro-Lena polynyas are significantly larger and exhibit high occurrence frequencies. This scenario may be linked to changes in large-scale atmospheric circulation and the dominance of western circulation patterns.

Keywords: flaw polynya, flaw lead, Laptev Sea, analysis of polygon, sea ice, landfast ice

REFERENCES

Astakhov A.S., Babich V.V., Gukov A.Y., Alatorcev A.V. The winter Laptev Sea polynya and Arctic Oscilllation during the last 300 years. Reconstructions on geochemical proxy. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2023, 511 (1): 86–92. https://doi.org/10.31857/S2686739723600406 [In Russian].

Afanasyeva E.V., Alekseeva T.A., Sokolova J.V., Demchev D.M., Chufarova M.S., Bychenkov Yu.D., Devyataev O.S. AARI methodology for sea ice charts composition. *Rossiyskaya Arktika*. Russian Arctic. 2019, 7: 5–20. https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10071 [In Russian].

Borodachev V.E., Gavrilo V.P., Kazanskiy M.M. Slovar' morskih ledovyh terminov. Dictionary of sea ice terminology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1994: 127 p. [In Russian].

Vize V.Yu. Seas of the Soviet Arctic. Moscow – Leningrad: Glavsevmorput Publishing House, 1948: 414 p. [In Russian].

Gorbunov Yu.A., Gudkovich Z.M., Appel I.L. Features of ice drift in the southeastern part of the Laptev Sea. POLEKS-Sever-76, Ch. N. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1979: 45–65 [In Russian].

Gukov A.Y. Ecosystem of the Siberian polynya. Moscow: Nauchny Mir, 1999: 334 p. [In Russian].

Dumanskaya I.O. Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia. Obninsk: Publishing house of IG-SOCIN, 2017: 640 p. [In Russian].

Egorov A.G. The Russian Arctic seas ice age composition and thickness variation in winter periods at the beginning of the 21st century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 124–143. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143 [In Russian].

Egorov A.G., Pavlova E.A. Change in the time of stable ice formation in the Russian Eastern Arctic seas at the beginning of 21st century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (4): 389–404. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404 [In Russian].

Zakharov V.F. The role ofpolynia in the Laptev Sea hydrochemical and ice regime. *Okeanologiya*. Oceanology. 1966, 24: 168–179 [In Russian].

Karelin I.D., Karklin V.P. Landfast ice and flaw polynyas of the Arctic seas of Siberian offshore in late XX – early XXI century. Saint Petersburg: Publishing house of AARI, 2012: 180 p. [In Russian].

Krutskikh B.A., Lagutin B.L. Hydrometeorological conditions of the seas shelf zone of the USSR. Volume 11. Laptev Sea. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1986. [In Russian].

Kupetsky V.N. Stationary polynyas in freezing seas. *Vestnik Akademii nauk*. Bulletin of the Academy of Sciences. 1959, 12: 172 p. [In Russian].

May R., Ganieva K, Topaj A., Yulin A. Frequency of occurrence of fast ice calculated from polygons of digitized ice charts (by the example of the Kara Sea). *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2022, 26 (5): 29–40. https://doi.org/10.15372/KZ20220503 [In Russian].

Makshtas A.P. Thermal balance of Arctic ice in summer. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984: 67 p. [In Russian].

World Data Center for Sea Ice. Retrieved from: http://wdc.aari.ru/datasets/d0004 Last access: October 6, 2023. [In Russian].

Morozov E.G., Pisarev S.V. Internal waves and the formation of a polynya in the Laptev Sea. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. Reports of the Academy of Sciences. 2004, 398 (2): 255–258.

Review of hydrometeorological processes in the North Polar region in 2020. ISSN 2618-6721. Saint Petersburg: AARI, 2021. [In Russian].

Dangerous ice phenomena for navigation in the Arctic. Saint Petersburg: AARI, 2010: 320 p. [In Russian].

Timofeeva A.B., Sharatunova M.V., Prokhorova U.V. Estimation of fast ice thickness multiyear variability in the Russian Arctic seas according to polar stations data. *Problemy Arktiki I Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2023: 69 (3): 310–330 [In Russian].

Cavalieri D.J., Martin S. The contribution of Alaskan, Siberian, and Canadian coastal polynyas to the halocline layer of Arctic Ocean. Journ. of Geophys. Research. 1994, 99 (C9): 18343–18362.

Comiso J.J. Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover. Journ. of Climatology. 2012, 25: 1176–1193.

JCOMM Technical Report No. 23, SIGRID-3: A vector archive format for sea ice georeferenced information and data. 2014.

Fiedler E.K., Lachlan-Cope T.A., Renfrew I.A., King J.C. Convective heat transfer over thin ice covered coastal polynyas. Journ. of Geophys. Research. 2010, 115: C10051. https://doi.org/10.1029/2009JC005797

Kassens H., Thiede J. Climatological significance of Arctic Sea ice at present and in the past. Russian-German Cooperation in the Siberian shelf seas: geo-system Laptev-Sea. 1994: 144 (1).

Petty A.A., Stroeve J.C., Holland P.R., Boisvert L.N., Bliss A.C., Kimura N., Meier W.N. The Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows. The Cryosphere. 2018, 12 (2): 433–453. http://doi.org/10.5194/tc-12-433-2018

Serreze M.C., Stroeve J., Barrett A.P., Boisvert L.N. Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale. Journ. of Geophys. Research. Atmosphere. 2016, 121: 11463–11485. https://doi.org/10.1002/2016JD025161

Timofeeva A., May R., Rubchenia A. Estimation of landfast ice occurrence frequency in the Laptev Sea based on the polygons analysis of electronic ice charts. Proc. of the Thirty-fourth (2024) International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, June 16–21, 2024.

Willmes S., Adams S., Schroder D., Heinemann G. Spatio-temporal variability of polynya dynamics and ice production in the Laptev Sea between the winters of 1979/80 and 2007/08. Polar Research. 2011, 30 (5971): 1–16. https://doi.org/10.3402/polar.v30i0.5971

World Meteorological Organization. Sea ice Nomenclature; WMO, 2014: 259.