КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 5, с. 29–40 **https://www.sibran.ru**

КРИОГЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МОРЯХ И ОКЕАНАХ

УДК 551.467 DOI: 10.15372/KZ20220503

ПОВТОРЯЕМОСТЬ ПОЯВЛЕНИЯ ПРИПАЯ, ВЫЧИСЛЕННАЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОЛИГОНОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛЕДОВЫХ КАРТ (НА ПРИМЕРЕ КАРСКОГО МОРЯ)

Р.И. Май[1,2], К.Р. Ганиева[1], А.Г. Топаж[3], А.В. Юлин[4]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра океанологии,*
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Россия; kimaloljev@gmail.com
[2] *Крыловский государственный научный центр, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, Россия; rimay@mail.ru*
[3] *ООО "Бюро Гиперборея", 191015, Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, 6А, Россия; alex.topaj@gmail.com*
[4] *Арктический и антарктический НИИ, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия; icefor@aari.ru*

Многие элементы природной среды представляют собой площадные объекты, которые меняют свое положение и форму во всех масштабах изменчивости. Для морского льда такими элементами могут быть припай, дрейфующий лед, полыньи, ледяные массивы, граница многолетних льдов. Этими элементами могут быть также границы ледника, вечной мерзлоты, снежного покрова, лесной зоны, различные изолинии гидрометеорологических полей (изотермы, изобары и др.). Для анализа таких данных, как правило, используются аппроксимации в виде сеточной области или системы разрезов. В статье предлагается прямой анализ данных, основанный на операциях с векторными полигонами. Создан и протестирован эффективный алгоритм расчета вероятности (частоты повторяемости) неограниченного количества полигонов, предложен критерий подбора одной из реальных кромок полигона в качестве аналога изолинии вероятности пересечений полигонов. Созданная методика была протестирована на данных о припае Карского моря, взятых из электронных ледовых карт ААНИИ за 1998–2020 гг. По этим данным получены карты вероятности припая для холодного сезона каждого года и для одного времени года за весь рассматриваемый промежуток времени, оценены режимные характеристики припая, выявлена тенденция уменьшения припайных льдов. Для первой декады мая (период максимального устойчивого развития припая) для экстремальных, медианных и квартильных изолиний вероятности подобраны аналоги из фактических рядов наблюдений.

Ключевые слова: *припай, морской лед, Карское море, анализ полигонов.*

FREQUENCY OF OCCURRENCE OF FAST ICE CALCULATED FROM POLYGONS OF DIGITIZED ICE CHARTS (BY THE EXAMPLE OF THE KARA SEA)

R.I. May[1,2], K.R. Ganieva[1], A.G. Topaj[3], A.V. Yulin[4]

[1] *St. Petersburg State University, Department of Oceanology,*
Universitetskaya emb. 7/9, St. Petersburg, 199034, Russia; rimay@mail.ru
[2] *Krylov State Research Center, Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia*
[3]*LLC "Bureau Hyperborea", Kavalergardskaya str. 6A, St. Petersburg, 191015, Russia*
[4]*Arctic and Antarctic Research Institute, Beringa str. 38, St. Petersburg, 199397, Russia*

Many elements of the natural environment are areal objects that change their position and shape at all scales of variability. For sea ice, such elements can be fast ice, drifting ice, polynyas, ice massifs, boundaries of multi-year ice. In other earth sciences, these are the boundaries of glaciers, permafrost, snow cover, forest zone, various isolines of meteorological and oceanological fields (isotherms, isobars, etc.). To analyze such objects, approximations in the form of a grid area (rasterization) or a system of sections are usually used. In this article, we suggest a direct analysis of these objects based on operations with vector polygons. An efficient algorithm for calculating the probability (frequency of occurrence) of an unlimited number of polygons has been developed and tested. A criterion for selecting one of the real edges of a polygon as an analogue of the isoline of probability of intersections of polygons is proposed. The developed method has been tested using data on the fast ice of the Kara Sea taken from the digital ice charts developed by the Arctic and Antarctic Research Institute for 1998–2020. As a result, the maps of fast ice probability for the cold season of each year and for a given time of the year for the entire considered period have been obtained. Based on these data, the operational characteristics of fast ice have been estimated, and a tendency for a decrease in the area of fast ice during the considered period has been revealed. For the beginning of May (period of the maximum development of fast ice), analogues from factual observations characterizing extreme, median, and quartile probability isolines of fast ice occurrence have been found.

Key words: *fast ice, sea ice, Kara Sea, analysis of polygons.*

ВВЕДЕНИЕ

Припай арктических морей (неподвижные льды вдоль береговой черты) является уникальным ледяным образованием, которое формируется постоянно в холодный сезон года в прибрежной зоне побережья материка и островов. Наличие припая – это характерная особенность ледового режима арктических морей в зимний сезон [*Визе, 1944, 1948; Зубов, 1944*]. Согласно определению [*Руководство..., 1981; ВМО – № 259..., 2014; Атлас..., 2018*], припаем считается морской лед, который образуется и остается неподвижным вдоль побережья, где он прикреплен к берегу, ледяной стене, ледяному барьеру, между отмелями или севшими на отмели стамухами. Припай может образоваться естественным образом из соленой воды или в результате примерзания к берегу или припаю плавучего льда любой возрастной категории.

Как правило, припай обладает максимальной толщиной среди льдов такого же возраста вследствие его длительного и спокойного нарастания [*Гудкович и др., 1972; Горбунов и др., 1983*]. Припай кардинально меняет характеристики гидрологического режима занимаемой акватории. Припай (в отличие от дрейфующего льда) является одной из причин сезонной изменчивости характеристик прилива. Циркуляция вод под припаем отличается от циркуляции вод под дрейфующим льдом. Граница припая может быть областью интенсивного торосообразования при нажимном дрейфе льда. И наоборот, при отжимных ветрах у границ припая образуются полыньи с особыми гидрологическими и термобалансовыми условиями [*Гордиенко, 1971; Карелин, Карклин, 2012*]. Припай важен с прикладной точки зрения: с одной стороны, он может стать препятствием для навигации, с другой – неподвижный лед может служить временным причалом для выгрузки грузов у необорудованного берега. Образованные у припая полыньи, чаще всего, являются наиболее легкими районами для арктической навигации. Канал, проложенный в припае, сохраняет свое положение и используется в течение всего периода навигации.

Оценка режимных характеристик припая, определяемых вдоль заданных створов, была проведена в работах [*Карелин, Карклин, 2012; Архипов и др., 2017; Dmitrenko et al., 1999*]. В Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) используются стандартные створы, которые проведены перпендикулярно береговой линии. Расстояние между створами составляет от 50 до 150 км, на Карское море приходится всего 28 стандартных створов [*Карелин, Карклин, 2012*]. Очевидно, что точность описания припая зависит от количества выбранных створов. При больших расстояниях между створами полученные статистические характеристики представляют собой полигональные объекты с грубым пространственным разрешением. В работе [*Павлова и др., 2019*] приведена количественная оценка погрешности определения максимального припая Карского моря, определенного по стандартным створам ААНИИ: максимальная ошибка ширины припая составила ~30–40 км.

Увеличение частоты створов может до некоторой степени нивелировать эту ошибку. В работах [*Mahoney et al., 2007, 2014*] для побережья Аляски створы были проведены вдоль точек, находящихся на побережье, и на линии, отстоящей от побережья на 150 км. Точки створов на мористой линии располагались с дискретностью 1 км и соединялись с ближайшими точками на побережье. По этим створам на основе композиции из различных радиолокационных спутниковых снимков определялись координаты кромки припая. Таким образом, частая система створов используется для автоматического определения границ припая и определения некоторых статистических характеристик распространения припая, рассчитанных вдоль створов [*Mahoney et al., 2007, 2014*].

Даже при высокой частоте проведения створов этот метод содержит неопределенности: при извилистой береговой линии (заливы, губы, мысы, полуострова, острова) створы, перпендикулярные берегу, могут пересекаться, находиться полностью в припае, пересекать кромки припая противоположных берегов и т. д.

Еще один метод исследования режимных характеристик припая основан на использовании сеточных областей, узлы которых содержат признак наличия или отсутствия припая. Такой метод использовался в работах [*Divine et al., 2004; Galley et al., 2012; Mahoney et al., 2007, 2014; Yu et al., 2014; Selyuzhenok et al., 2015; Li et al., 2020*]. Сумма признаков наличия или отсутствия припая в каждой ячейке сеточной области, отнесенная к общему количеству анализируемых полей припая, позволяет оценить вероятности наличия припая в ячейке. При этом в сеточных методах результаты анализа зависят от пространственного шага. Проблема аппроксимации припая сеточной областью поднималась в работах [*Павлова и др., 2019; Yu et al., 2014*].

Очевидно, чем меньше пространственный шаг сетки, тем точнее аппроксимация. Однако приемлемые пространственные шаги сетки требуют значительных вычислительных ресурсов. В работах по исследованию режимных характеристик припая используются сетки с пространственными шагами от 100 м [*Mahoney et al., 2007, 2014*] до 12.5 км [*Divine et al., 2004; Yu et al., 2014*].

Можно сделать вывод, что все работы, посвященные анализу изменчивости припая, основаны на створном и сеточном методах. Современная ледовая информация представляет собой векторные полигональные объекты, которые описывают площадные объекты (припай, ледовые зоны, полыньи, разводья) в виде последовательности координат точек контура. При этом статистический анализ данных в виде линий (кривых, функций) принципиально возможен [*Ramsay, Silverman, 2005*].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Электронные ледовые карты

Для хранения и распространения ледовой информации были разработаны специальные форматы SIGRID, позволяющие хранить многомерные данные о ледяном покрове. Первые две версии формата были основаны на матричном принципе хранения информации. В 1995 г. в ААНИИ был разработан формат SIGRID-3, который позволяет хранить векторную информацию о ледяном покрове в виде полигонов, оконтуривающих определенные зоны с одинаковыми параметрами льда. Такой векторный формат наиболее подходит для описания ледовых зон вообще и припая в частности. Для хранения полигонов ледовых зон в формате SIGRID-3 используется структура файлов географической информационной системы, разработанная фирмой ESRI. Формат SIGRID-3 принят Всемирной метеорологической организацией в качестве основного формата хранения и распространения ледовой информации. Этот формат используется основными научными центрами по изучению морского льда.

В данной статье описываются результаты анализа ледовой информации, предоставляемой ААНИИ через Международный центр данных – Морской лед (МЦД–МЛ) [*http://wdc.aari.ru/datasets*]. Информация охватывает временной интервал с 1997 г. по настоящее время с недельной дискретностью. Ледовые карты ААНИИ, представленные на сайте МЦД–МЛ, созданы на основе анализа ледовыми экспертами спутниковой информации в различных диапазонах электромагнитного спектра. Ледовый эксперт определяет ледовые зоны, основываясь на своем опыте, знании режимных характеристик ледяного покрова данной акватории и на постоянном отслеживании изменений ледовой обстановки. Каждый ледовый эксперт специализируется на отдельной акватории, поэтому ААНИИ предоставляет ледовые карты отдельно для 12 арктических и замерзающих морей России [*Афанасьева и др., 2019*]. В этой работе приведены расчеты режимных характеристик появления припая на примере Карского моря как акватории, где осуществляется круглогодичное плавание судов.

В каждой электронной ледовой карте по признаку ледовой зоны выделялись координаты границ припая. Обособленные контуры припая на один и тот же момент времени объединялись в один полигон припая. Так как ледовые карты ААНИИ создаются экспертами вручную, то в некоторых случаях могут возникать объективные и субъективные ошибки. На первом этапе все полигоны припая были визуально проверены на наличие таких ошибок. Непригодными к анализу были признаны ледовые карты за те даты, когда они не отображали информацию о припае в какой-то отдельной части акватории (22.12.1999, 05.06.2003, 29.04.2014, 25.12.2018). В некоторых случаях либо полностью отсутствовал припай (30.10.2003, 27.02.2018), либо отображаемый полигон припая существенно отличался от информации соседних во времени ледовых карт (12.08.2003). Кроме того, на некоторых ледовых картах было обнаружено, что полигон припая искусственно обрезан в Обской губе и Енисейском заливе. Недостающие участки полигонов припая в Обской губе и Енисейском заливе были восстановлены для того, чтобы при анализе не возникали ошибки в расчете площадей из-за искусственных искажений ледовых зон.

Операции с векторными полигонами

Операции с полигональными объектами можно описать математическими символами из алгебры множеств: объединение полигонов ($A \cup B$), вычитание полигонов ($A \backslash B$) и пересечение полигонов ($A \cap B$) (рис. 1). На основе этих трех действий можно создать алгоритмы расчета повторяемости (вероятности) пересечений полигонов.

Рассмотрим выборку из N полигонов P_n, $n = 1, ..., N$, для которых мы будем строить вероятностные полигоны пересечений – аналог построения гистограммы или эмпирического распределения вероятностей для скалярных величин. Состав этой выборки определяется семантикой рассматриваемой проблемы. Например, это могут быть все полигоны за ограниченный промежуток календарного года (распределение формы припая в апреле) или за весь ледовый сезон. Объединение всех полигонов припая P_n даст один обширный,

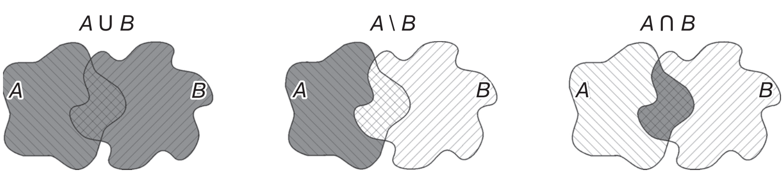

Рис. 1. Операции с векторными полигонами.

максимальный по площади и охвату полигон, где *хотя бы один раз* отмечался припай. Этот полигон $Q_{1/N}$ будет отвечать области, где вероятность обнаружить припай больше или равна $1/N$:

$$Q_{1/N} \geq \bigcup_{n=1}^{N} P_n.$$

В то же время пересечение всех полигонов выборки формирует множество точек, в которых припай наблюдается для *всех* рассмотренных ледовых карт, иными словами, это область, где вероятность обнаружить припай равна N/N, то есть единице:

$$Q_1 = Q_{N/N} = \bigcap_{n=1}^{N} P_n.$$

Наряду с этими крайними случаями представляет интерес возможность определения областей, которые занимает припай с любой промежуточной вероятностью n/N, где $n = 1, ..., N$. Наиболее очевидный алгоритм расчета таких полигонов вероятностей $Q_{n/N}$ заключается в следующем. Необходимо рассмотреть последовательно все подмножества полной выборки, состоящие ровно из n полигонов без повторений и без учета перестановок, для каждой из этих подвыборок Ω_k найти пересечение составляющих ее полигонов и все эти пересечения объединить:

$$Q_{n/N} = \bigcup_{k=1}^{C_n^N} \left(\bigcap_{\Omega_k} P_i,\, i \in \Omega_k \right), \tag{1}$$

где $C_n^N = \dfrac{N!}{n!(N-n)!}$ – количество сочетаний.

К сожалению, прямая последовательность операций по формуле (1) зачастую не может быть технически реализована из-за экспоненциально возрастающей вычислительной сложности. Так, для размера исходной выборки в 22 полигона и вычисления “медианного” полигона пересечений, т. е. для $n = 11$, число анализируемых подвыборок равняется числу сочетаний из 22 по 11, что составляет 705 432 вариантов. Безусловно, выполнение такого количества операций над векторными полигонами затруднительно.

Возможно, эта особенность наиболее очевидного алгоритма (1) и объясняет тот факт, что до сих пор не проводился анализ полигонов напрямую, без промежуточной растровой (сеточной) или створной аппроксимации. Для решения этой проблемы авторами был предложен, реализован и апробирован алгоритм рекурсивного пересчета всего множества вероятностных полигонов пересечений при последовательном добавлении в выборку новых исходных полигонов. Можно сказать, что этот алгоритм выступает аналогом адаптивных алгоритмов статистического оценивания. Действительно, пусть на $(n-1)$-м шаге нашего алгоритма, т. е. для $n-1$ уже обработанных полигонов, нам известны вероятностные полигоны пересечения $R_{k/N}$, где каждый такой полигон представляет собой множество точек, попадающих строго в k исходных полигонов (в отличие от полигонов пересечения Q, для которых условие принадлежности формулируется как “не меньше, чем в k исходных полигонов”). Тогда при введении в рассмотрение нового исходного полигона P_n все эти полигоны на новом шаге алгоритма пересчитываются согласно простому правилу:

$$\begin{gathered} R_{k/N}^{n} = \left(R_{k-1/N}^{n-1} \cap P_n \right) \cup \left(R_{k/N}^{n-1} \setminus P_n \right); \\ R_{k/N}^{0} = \varnothing,\ k = 1, ..., N. \end{gathered} \tag{2}$$

Формула (2) демонстрирует, как создается множество точек, формирующих k-е множество пересечений исходных полигонов при появлении нового исходного полигона. Эти точки совпадают с точками для соответствующего $(k-1)$-множества на прошлом шаге, которые *попадают* в новый полигон, и точками для соответствующего k-множества на прошлом шаге, которые *не попадают* в новый полигон.

При этом интересующие нас полигоны пересечений кумулятивной вероятности $Q_{n/N}$ всегда могут быть вычислены по элементарной формуле

$$Q_{n/N} = \bigcup_{k=1}^{n} R_{k/N}. \tag{3}$$

Алгоритм, описанный формулами (2), (3), позволяет быстро рекуррентно рассчитывать полигоны вероятностей пересечений для неограниченного количества полигонов P_n, так как вычислительная сложность алгоритма с увеличением числа полигонов растет всего лишь по квадратичной зависимости.

Пространственный срез полученного поля повторяемости пересечений, проведенный ортогонально береговой линии и полигонам вероятности Q_p, будет внешне похож на эмпирическую функцию пространственного распределения величины вероятности, где по оси абсцисс откладывается расстояние, по оси ординат – значения вероятности, которые меняются от 0 в мористой части среза до 1 у берега. Таким образом, можно найти соответствия между рассматриваемым методом анализа векторных полигонов и створным методом. При этом возможно, что вдоль такого среза будут отмечаться локальные уменьшения вероятностей, связанные с влиянием местных условий (влияние припая, расположенного у отдельных островов, выдающихся элементов береговой линии, стамух и т. д.). Такие эффекты, свойственные створному методу, связаны с выбором положения и направления срезов.

В принятых обозначениях аналог интерквартильного расстояния будет представлять собой полигон Q_{IQR}, который можно рассчитать как разность полигонов $Q_{p=0.25}$ и $Q_{p=0.75}$:

$$Q_{IQR} = Q_{p=0.75} \setminus Q_{p=0.25}. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что полученные “вероятностные” полигоны нахождения припая Q_p никогда в точности не совпадут ни с одной из фактически наблюдаемых кромок припая P_n. Полученные при векторных операциях изолинии вероятности будут представлять собой ломаную линию, составленную из фрагментов кромок припая за разные годы или даты. Поэтому представляет интерес возможность замены полученной “виртуальной” изолинии ее каким-либо близким аналогом из реального мира. Для подбора одной, наиболее близкой к Q_p из всех наблюдаемых кромок припая P_n, можно воспользоваться концепцией “глубины функциональных данных” [*Lopez-Pintado, Romo, 2009*]. В функциональном анализе данных функция “глубины” определяет, насколько “глубоко” расположена точка или кривая в выбранном облаке данных в евклидовом пространстве, т. е. насколько близко она расположена к неявно определенному центру, имеющему максимальную “глубину”. Авторы в качестве критерия “глубины” линии припая, т. е. ее соответствия полученному “виртуальному” эталону, предлагают использовать условие $S(D_n) = \min$, где выбранная норма близости $S(D_n)$ – площадь полигона D_n, который определяется уравнением

$$D_n = \left(Q_p \setminus P_n\right) \cup \left(P_n \setminus Q_p\right).$$

Из всего набора наблюдаемых полигонов припая P_n выбирается тот, для которого площадь полигона D_n минимальна. Аналогичный критерий используется в методе наименьших квадратов: минимум суммы квадратов разности данных и аппроксимирующей функции имеет геометрический смысл как минимум площади между измеренными значениями и функцией.

Описанный выше алгоритм расчета вероятности пересечений полигонов был реализован на языке MatLab в виде набора программ и функций, файлы которых можно найти в свободном доступе по адресу [*https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/99879-probability-of-polygons-intersection*].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ледовые карты ААНИИ предоставляются с недельной дискретностью, поэтому для анализа полигонов припая авторы воспользовались декадами месяца. Каждый месяц разбивается на три декады и из всего массива данных для каждого года, каждого месяца, каждой декады выбирается одна ледовая карта, наиболее близко расположенная во времени к центральному дню декады. В качестве таких центральных дат авторы выбрали числа 5, 15, 25 каждого месяца. Учитывая, что ледовые карты создаются по серии спутниковых снимков, охватывающей несколько суток, можно сделать допущение, что максимальные отклонения в датах недельной и декадной дискретности в трое суток не сильно отразятся на результатах анализа.

С помощью описанного выше метода оценки вероятности пересечения полигонов можно определить режимные характеристики появления припая. В зависимости от отрезка времени, за который анализируется массив данных, можно оценить сезонную или межгодовую изменчивость повторяемости припая.

Анализ данных за один холодный сезон покажет повторяемость положения припая за данный год. Сравнение годовых карт повторяемости положения припая за несколько лет позволит выявить межгодовую изменчивость. В качестве примера приведены полигоны вероятности положения припая в течение одного цикла образования и разрушения (октябрь–июль) за 2000, 2005, 2010, 2015 и 2020 гг. (рис. 2). По серии карт можно отметить тенденцию уменьшения площади, занимаемой припаем. За 1999–2005 гг. острова Сергея Кирова (77°15′ с.ш., 91° в.д.) и о. Воронина (77°15′ с.ш., 91° в.д.) большую часть рассматриваемого отрезка времени (октябрь–июль) находятся внутри обширного припая, соединенного с материком. Как видно на рис. 2, вероятность нахождения припая между этими островами и п-овом Таймыр в 2000 и 2005 гг. составляет 0.6–0.8, т. е. 15–21 декаду из 27. Аналогичные значения вероятности отмечаются в другие годы временного интервала с 1998 по 2005 г., за исключением 2002 г., когда указанные острова находились в припае, соединенном с материком всего 2–3 декады из 27 декад (вероятность около 0.1). С 2008 по 2020 г. отмечается иная картина – припай островов Сергея Кирова и Воронина соединялся с материковым припаем менее чем 11 декад из 27 (вероятность менее 0.41) (см. рис. 2). Исключением является 2013 год, когда вероятность появления припая между этими островами и п-овом Таймыр составила 0.66 (17 декад из 27), при этом в 2012, 2016 и 2017 гг. припаи островов Сергея Кирова и Воронина всегда оставались обособленными от материкового припая. Аналогичная тенденция (уменьшение вероятности появления припая за рассматриваемый отрезок времени) отмечается в Обской, Гыданской губах и Енисейсом заливе (см. рис. 2).

Помимо качественного описания межгодовой изменчивости полученные полигоны вероятностей положения припая могут дать некоторые ко-

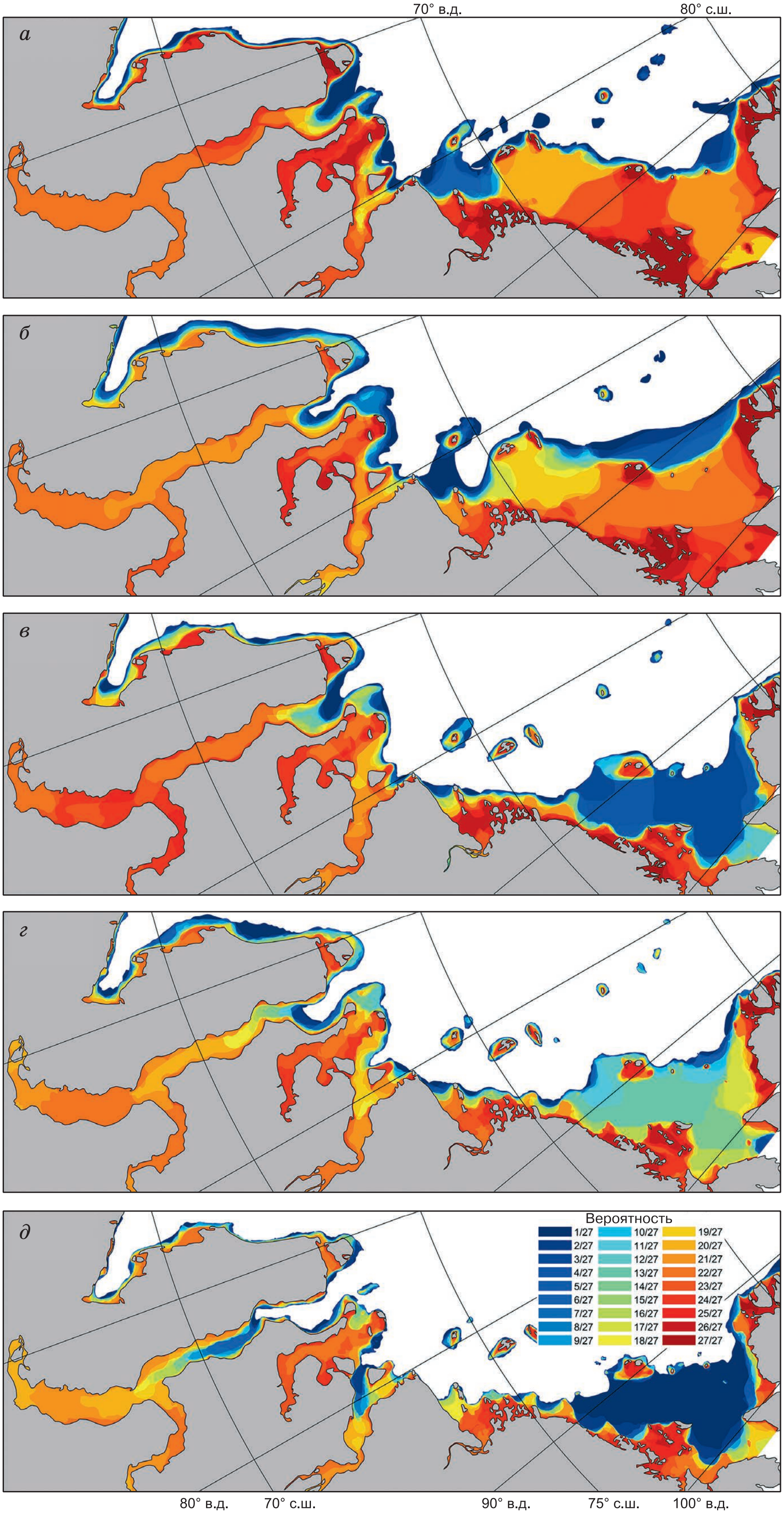

Рис. 2. Вероятность нахождения припая с 1 ноября по 31 июля в разные годы:
а – 11.1999–07.2000; *б* – 11.2004–07.2005; *в* – 11.2009–07.2010; *г* – 11.2014–07.2015; *д* – 11.2019–07.2020.

личественные характеристики: площадь или линейная ширина припая. Например, представление квантилей вероятности появления припая в виде полигонов позволит найти площадь, занимаемую квантилем заданной вероятности. Сейчас для исследования межгодовой и климатической изменчивости распространения припая используются временные ряды максимальной или средней за год площади припая. Возможно, что временной ряд площадей, занимаемых квантилями различных вероятностей, позволит выявить скрытые закономерности межгодовой и климатической изменчивости припая.

Еще один, часто применяемый способ расчета режимных характеристик состояния природных параметров, подверженных сезонной изменчивости, сводится к анализу данных, отстоящих друг от друга на один год. Для примера определим вероятность появления припая в первой декаде мая за все время наблюдений. Выбор первой декады мая обусловлен тем, что в это время отмечаются максимальные площади припая в Карском море.

Припай с вероятностью 1 (минимальное устойчивое развитие) будет отмечаться в Тазовской губе и южной части Обской губы, Гыданской губе и Енисейском заливе в виде узкой полосы у ямальского берега Байдарацкой губы, в проливе Малыгина, отделяющего о. Белый от п-ова Ямал, в Пясинском заливе и акватории архипелага Норденшельда (рис. 3). Полигон $Q_{p=1}$ состоит из трех-четырех изолированных областей. Полигон вероятности обнаружения припая прерывается на выходах из Обской губы и Енисейского залива, а также в районе м. Диксон. За все 22 года в первой декаде мая припай всегда отмечался возле островов Сергея Кирова, о. Воронина и в проливах архипелага Северная Земля.

Область, где хотя бы раз в первую декаду мая был отмечен припай (максимально возможное развитие припая), представляет собой обширный полигон $Q_{p=1/22}$, который связан с материком и включает все острова рассматриваемой части акватории Карского моря, за исключением о. Уединения. Грани полигона $Q_{p=1/22}$ располагаются примерно в 20 км севернее островов Известий ЦИК, Сергея Кирова и Воронина. Расстояние от островов Известий ЦИК и Арктического Института до кромки полигона $Q_{p=1/22}$ составляет около 10 км. Грань полигона $Q_{p=1/22}$ расположена на расстоянии от 30 до 60 км от островов Вилькицкого, Шокальского и Белый. Полигон $Q_{p=1/22}$ у п-ова Ямал имеет ширину 30–50 км, возле о. Вайгач и Югорского полуострова ширина полигона составляет примерно 10 км. Обособленный припай имеет о. Уединения (максимальная ширина припая до 20 км). Кроме того, отмечаются локальные, изолированные от берега области припая, которые в мелководных районах могут на короткое время формироваться возле стамух. Следует также признать, что в некоторых случаях дрейфующие поля оторванного припая на электронных ледовых картах ААНИИ также обозначаются как припай.

Область появления припая с вероятностью 0.5 разделена на три части: припай у о. Вайгач и северной части Югорского полуострова; полигон, расположенный вдоль Байдарацкой губы, Ямала, Обской, Гыданской губ и Енисейского залива; припай, расположенный западнее о. Диксон вдоль побережья п-ова Таймыр и архипелага Северная Земля. Внутри полигона $Q_{p=0.5}$, соединенного с материком, находятся острова Белый, Шокальского, Вилькицкого, Сергея Кирова и Воронина. Изолированные медианные полигоны встречаемости припая отмечаются у островов Свердрупа, Арктического Института, Известий ЦИК и Уединения. Часть побережья возле о. Диксон полигон $Q_{p=0.5}$ не захватывает, следовательно, более чем в 50 % случаев припая в этой части моря не отмечается.

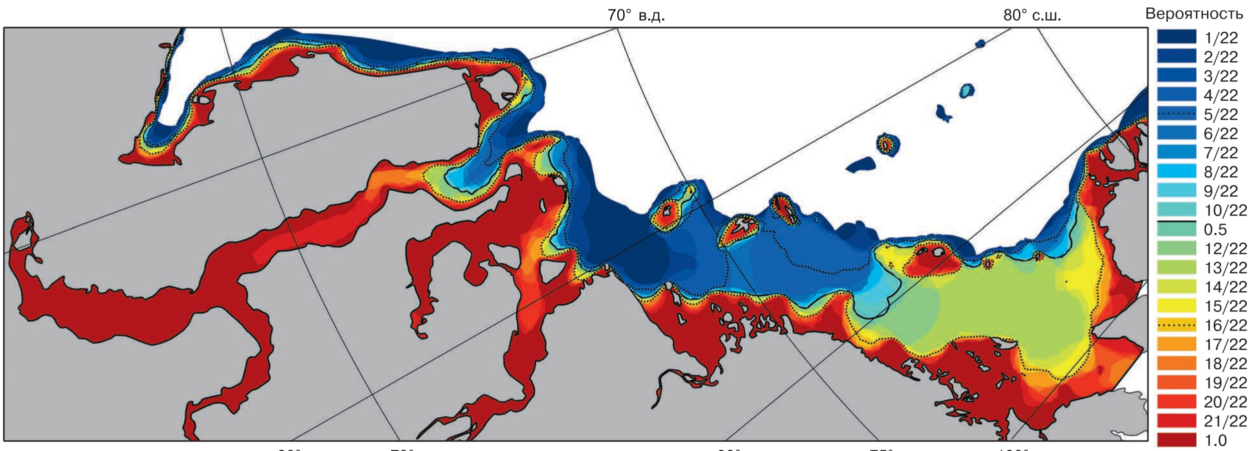

Рис. 3. Вероятность появления припая в первую декаду мая (1998–2020 гг.).

На рис. 3 пунктиром показаны линии полигонов вероятностей 0.25 и 0.75, полученные двумерной интерполяцией координат вершин полигонов. В пространстве между этими двумя полигонами кромка припая будет находиться в 50 % случаев. Расстояние между полигонами квартилей назовем интерквартильным расстоянием Q_{IQR}. Как видно на рис. 3, полигон интерквартильного расстояния имеет разную протяженность в различных частях моря: в Байдарацкой губе и у западного побережья п-ова Ямал его ширина составляет около 10 км, восточнее о. Белый у входа в Обскую губу ширина полигона Q_{IQR} составляет 20 км, максимальная, около 90 км, в самой Обской губе. В акватории между островами Арктического Института и Сергея Кирова полигон интерквартильного расстояния имеет ширину 50–100 км, восточнее меридиана 90° в.д. ширина полигона Q_{IQR} составляет 100–200 км. На рис. 3 видно, что острова Арктического Института, Сергея Кирова и Воронина находятся внутри полигона квартиля $Q_{p=0.25}$, соединенного с материковым берегом. Острова Свердрупа, Известий ЦИК, Уединения имеют свои обособленные полигоны квартиля $Q_{p=0.25}$.

Видно, что грани интерквартильных полигонов $Q_{p=0.25}$ и $Q_{p=0.75}$ расположены несимметрично относительно линии медианного полигона $Q_{p=0.5}$ (см. рис. 3), что свидетельствует о несимметричном законе распределения вероятностей появления припая вдоль ортогональных берегу и полигонам вероятности Q_p направлений. Причем асимметричность распределения меняет знак: восточнее меридиана 90° в.д. расстояние между гранями полигонов $Q_{p=0.75}$ и $Q_{p=0.5}$ больше, чем расстояние между полигонами $Q_{p=0.25}$ и $Q_{p=0.5}$. У входа в Обскую губу и в акватории, расположенной между островами Арктического Института и островами Сергея Кирова, отмечается противоположная тенденция.

Отмеченные на рис. 2, 3 особенности положения изолиний вероятности появления припая согласуются с известными режимными характеристиками Карского моря. Температура воздуха, рельеф дна, конфигурация берегов и островов, ветровой и гидрологический режимы определяют развитие припая [*Гордиенко, 1971; Гудкович и др., 1972; Горбунов и др., 1983; Карелин, Карклин, 2012*]. Формирование припая происходит после начала ледообразования в прибрежной части при достижении молодым льдом стадии серо-белого (диапазон толщины 20–30 см). В начале зимнего периода происходит интенсивное увеличение ширины припая, связанное с увеличением толщины льда и упрочнением самой ледяной пластины. В середине зимы развитие ширины припая замедляется и прекращается совсем. Ширина припая может изменяться в результате действия отжимных или нажимных ветров, периодических и сгонно-нагонных колебаний уровня моря. В весенний период за счет положительной температуры и потока солнечной радиации лед начинает таять и разрушаться. Прочность ледяного покрова существенно снижается и начинает происходить скачкообразное уменьшение ширины припая в зависимости от направления и силы ветра. Взлом припая, как правило, начинается с его мористой кромки и движется в сторону берега, хотя иногда отмечались случаи быстрого полного разрушения всего припая.

Такая схема динамики припая обусловливает максимальные вероятности обнаружения припая возле берега. Отмечаемая на рис. 2 тенденция сокращения площади припая согласуется с общим положительным трендом изменения температуры воздуха в этом районе [*Карелин, Карклин, 2012*].

Полученные полигоны вероятностей обнаружения припая Q_p представляют собой сложную комбинацию результатов объединения и пересечения различных фрагментов припаев P_n, измеренных по спутниковым снимкам в разные годы. В некоторых случаях требуется подобрать аналог полигону вероятности обнаружения припая Q_p из массива измеренных границ припая в разные годы. Полигоны-аналоги подбирались по двум критериям: 1) минимум площади симметрической разности $(Q_p \setminus P_n) \cup (P_n \setminus Q_p)$; 2) минимум разности площадей полигонов Q_p и P_n (рис. 4). На рис. 4 показано соответствие полигонов вероятностей Q_p и полигонов припая P_n для первой декады мая. Здесь заметна однонаправленная тенденция:

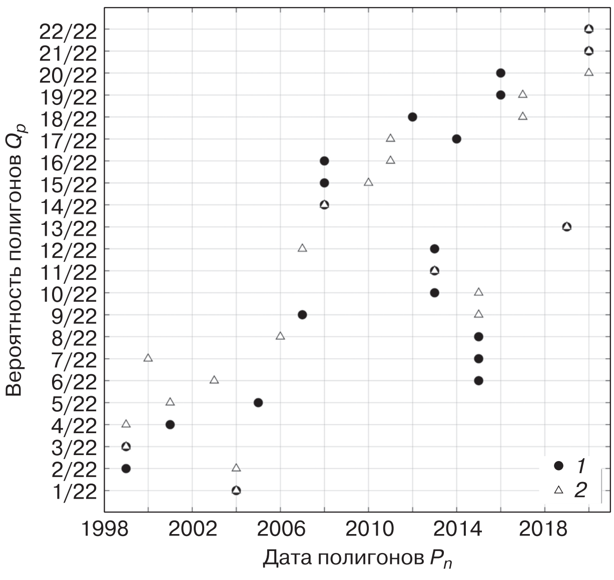

Рис. 4. Соответствие полигонов вероятностей Q_p и полигонов припая P_n в первую декаду мая (1998–2020 гг.), рассчитанные как:

1 – минимум площади полигонов $(Q_p \setminus P_n) \cup (P_n \setminus Q_p)$; *2* – минимум разностей площадей полигонов Q_p и P_n.

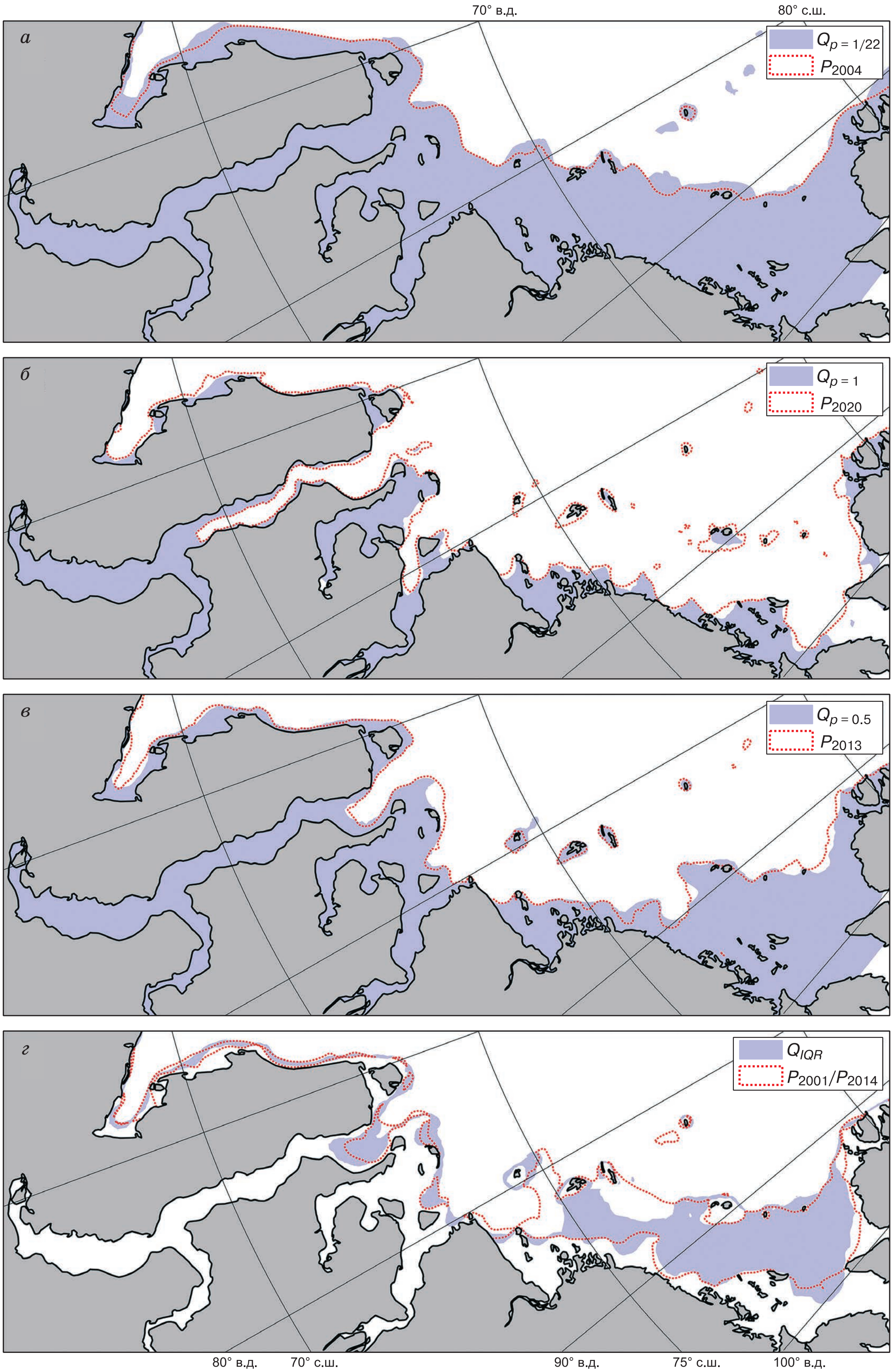

Рис. 5. Области появления припая в первой декаде мая с вероятностью:
а – 1/22, *б* – 1, *в* – 0.5; *г* – область интерквартильного расстояния.

в первой декаде мая полигоны с большими значениями вероятности появления припая соответствуют полигонам припая последних лет (2014–2020), более обширные полигоны с малыми значениями вероятности соответствуют полигонам припая, обследованным в первой половине рассматриваемого периода (1998–2008). Отмеченная тенденция также указывает на уменьшение площади припайного льда за последние 22 года.

Полигон вероятности нахождения припая $Q_{p\,=\,1/22}$ должен быть больше или равен самому обширному из всех отмеченных на спутниковых снимках припаю. Поэтому для полигона $Q_{p\,=\,1/22}$ оба критерия указали на припай, который приходится на 05.05.2004 г. (рис. 5, *а*). Аналогичная ситуация складывается с минимально возможным по площади полигоном $Q_{p\,=\,1}$, показывающим область, где в первой декаде мая из всех 22 лет наблюдений все 22 раза отмечался припай. Оба критерия указали на последнюю из рассматриваемого массива ледовых карт ААНИИ, датированную 05.05.2020 г. (см. рис. 5, *б*). Медианная линия появления припая (полигон $Q_{p\,=\,0.5}$) наилучшим образом совпадает с припаем, отмечавшимся 07.05.2013 г. (см. рис. 5, *в*). В остальных случаях рассматриваемые критерии подбора дают, как правило, разные результаты, и по критерию $\left(Q_p \setminus P_n\right) \cup \left(P_n \setminus Q_p\right)$ отмечено более точное совпадение граней полигонов Q_p и P_n. Область интерквартильного расстояния Q_{IQR} ограничивается полигонами $Q_{p\,=\,0.25}$ и $Q_{p\,=\,0.75}$, в качестве их аналогов могут быть использованы линии кромки припая за 07.05.2014 и 08.05.2001 гг. соответственно (см. рис. 5, *г*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Параметры природной среды представляют собой n-мерные функции ($n \geqslant 1$), которые при наблюдениях записываются в виде дискретного набора данных в n-мерном пространстве. С развитием численных методов и вычислительных технологий все чаще появляется запрос на получение и анализ данных в первоначальном виде, т. е. в виде непрерывных n-мерных функций, без упрощающей дискретизации. Так, в последние десятилетия выделяется обособленное направление в математической статистике – анализ функциональных данных [*Ramsay, Silverman, 2005*]. Этот анализ, основанный на использовании данных первоначального вида, находит применение в различных областях науки, в том числе в науках о Земле.

Очевидно, что такой анализ востребован и при исследовании ледяного покрова. Для этого существует несколько предпосылок: а) в природе кромка дрейфующего льда, припай, полыньи представляют собой замкнутую линию; б) традиционно пространственно распределенная ледовая информация обобщается и записывается в виде ледовых зон, которые также являются замкнутыми линиями; в) электронные ледовые карты, принятые Всемирной метеорологической организацией, представляют собой не растровые картинки, а наборы векторных полигонов, оформленных как shape-файлы с геоинформационной привязкой.

В настоящей работе сделана, по-видимому, первая попытка применить исходные векторные данные к анализу информации о пространственном распределении ледяного покрова. На основе стандартных, строго формализованных и оптимальным образом реализованных во многих прикладных программных библиотеках операций с векторными полигонами были разработаны алгоритмы расчета вероятностей пересечений полигонов, с помощью которых была рассчитана вероятность (повторяемость) нахождения припая в Карском море. Предложенный авторами метод формально нельзя причислить к методам анализа функциональных данных, однако он основан на той же идеологии устранения промежуточных процедур, связанных с переводом функций (полигонов) в набор дискретных значений (матрицы или набор створов).

Предложенный метод был применен для оценки вероятности появления припая Карского моря за период с 1998 по 2020 г. Область экстремального распространения припайного льда в первой декаде мая включает острова Вилькицкого, Шокальского, Белый, Арктического Института, Известий ЦИК, Сергея Кирова и Воронина. Кромка этой области расположена на 10–20 км севернее островов Известий ЦИК, Сергея Кирова, Воронина и севернее островов Вилькицкого, Шокальского и Белый на расстоянии от 30 до 60 км.

Анализ изменчивости координат кромок припайного льда за разные годы показал, что за 22-летний отрезок времени отмечается уменьшение области пространственного распределения припайного льда. Этот вывод был подтвержден как сравнением межгодовой изменчивости повторяемости положения припая за холодный сезон, так и подбором измеренных полигонов к различным полигонам вероятности появления припая. Припай в 1998–2008 гг. соответствует, как правило, полигонам с минимальной вероятностью и максимальными площадями, и, наоборот, припай, наблюдавшийся в мае 2020 г. больше всего соответствует области, где всегда наблюдается припай, т. е. полигону с максимальной вероятностью и минимальной площадью.

Этот алгоритм может быть применен для оценки вероятности появления любых данных, представленных в виде полигональных объектов. Такие объекты используются во многих науках о Земле, в том числе в гидрометеорологии и гляциологии, например, для описания кромки льда, границы ледников, вечной мерзлоты, снежного покрова, положения определенных изолиний полей (изотермы, изобары и др.). Таким образом, потенциальная сфера применения предложенной методологии может быть существенно шире примеров, рассмотренных в статье.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 17-79-20162).

Литература

Архипов В.В., Кокин О.В., Огородов С.А. и др. Кромка припая у ямальского берега Байдарацкой губы Карского моря в 2012–2016 гг.: ее динамика и роль в формировании современных борозд выпахивания на морском дне // Вести газовой науки, 2017, № 4 (32), с. 129–136.

Атлас ледяных образований / Под ред. В.М. Смоляницкого. СПб., Изд-во ААНИИ, 2018, 230 с.

Афанасьева Е.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В. и др. Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика, 2019, № 7, с. 5–20.

Визе В.Ю. Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. М., Изд-во Главсевморпути, 1944, 272 с.

Визе В.Ю. Моря Советской Арктики. М.; Л., Изд-во Главсевморпути, 1948, 416 с.

ВМО – № 259 Номенклатура ВМО по морскому льду. Т. I. Терминология. Всемирная метеорологическая организация, JCOMM Expert Team on Sea Ice, 2014, 121 с.

Горбунов Ю.А. Основы физико-статистических методов ледовых прогнозов и расчетов для арктических морей заблаговременностью до 30 суток / Ю.А. Горбунов, И.Д. Карелин, И.М. Кузнецов и др. Л., Гидрометеоиздат, 1983, 288 с.

Гордиенко П.А. Припайные льды арктических морей. Ч. I–II. Л., Гидрометеоиздат, 1971, 172 с.

Гудкович З.М. Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей / З.М. Гудкович, А.А. Кириллов, К.Г. Ковалев и др. Л., Гидрометеоиздат, 1972, 348 с.

Зубов Н.Н. Льды Арктики. М., Изд-во Главсевморпути, 1944, 360 с.

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

Павлова Е.А., Май Р.И., Миронов Е.У. и др. Методы расчета статистических характеристик границ распространения припая // Труды III Всерос. конф. "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития" (С.-Петербург, 18–19 дек. 2019 г.). СПб., Химиздат, 2019, с. 669–672.

Руководство по производству ледовой авиаразведки / Под ред. Н.А. Волкова. Л., Гидрометиздат, 1981, 239 с.

Divine D.V., Korsnes R., Makshtas A.P. Temporal and spatial variation of shore-fast ice in the Kara Sea // Continent. Shelf Res., 2004, vol. 24 (15), p. 1717–1736.

Dmitrenko I.A., Gribanov V.A., Volkov D.L. et al. Impact of river discharge on the fast ice extension in the Russian Arctic shelf area // Proc. of the 15th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC99) (Helsinki, August 23–27, 1999), Helsinki, Finland, 1999, p. 311–321.

Galley R.J., Else B.G.T., Howell S.E.L. et al. Landfast sea ice conditions in the Canadian Arctic: 1983–2009 // Arctic, 2012, vol. 65, No. 2, p. 133–144.

Li Z., Zhao J., Su J. et al. Spatial and temporal variations in the extent and thickness of Arctic Landfast Ice // Remote Sensing, 2020, vol. 12, p. 64.

Lopez-Pintado S., Romo J. On the concept of depth for functional data // J. Amer. Statistic. Assoc., 2009, vol. 104, No. 486, p. 718–734.

Mahoney A.R., Eicken H., Gaylord A.G., Shapiro L. Alaska landfast sea ice: Links with bathymetry and atmospheric circulation // J. Geophys. Res., 2007, vol. 112 (C2), p. C02001.

Mahoney A.R., Eicken H., Gaylord A.G., Gens R. Landfast sea ice extent in the Chukchi and Beaufort seas: The annual cycle and decadal variability // Cold Regions Sci. and Technol., 2014, vol. 103, p. 41–56.

Ramsay J.O., Silverman B.W. Functional Data Analysis. New York, Springer Verlag, 2005, 429 p.

Selyuzhenok V., Krumpen T., Mahoney A. et al. Seasonal and interannual variability of fast ice extent in the southeastern Laptev Sea between 1999 and 2013 // J. Geophys. Res. Oceans, 2015, vol. 120, p. 7791–7806.

Yu Y., Stern H., Fowler C. et al. Interannual Variability of Arctic Landfast Ice between 1976 and 2007 // J. Climate, 2014, vol. 27, p. 227–243.

URL: http://wdc.aari.ru/datasets (дата обращения: 01.09.2022).

URL: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/99879-probability-of-polygons-intersection (дата обращения: 01.09.2022).

References

Arhipov V.V., Kokin O.V., Ogorodov S.A. et al. Fast ice edge near the Yamal coast of the Baydaratskaya Bay of the Kara Sea in 2012–2016: its dynamics and role in the formation of modern plowing furrows on the seabed. Vesti gazovoj nauki [News of Gas Science], 2017, vol. 4, No. 32, p. 129–136 (in Russian).

Atlas ledyanykh obrazovanij [Atlas of Ice Formations]. V.M. Smolyanickij (Ed.). St. Petesburg, AARI, 2018, 230 p. (in Russian).

Afanas'eva E.V., Alekseeva T.A., Sokolova Yu.V. et al. AARI methodology for sea ice charts composition. Rossiiskaya Arktika [Russian Arctic], 2019, No. 7, p. 5–20 (in Russian).

Vize V.Y. Osnovy dolgosrochnyh ledovyh prognozov dlya arkticheskih morej [The Foundations of Long-Range Ice Forecasting for the Arctic Seas]. Moscow, Izd-vo Glavsevmorputi, 1944, 272 p. (in Russian).

Vize V.Y. Morya Sovetskoj Arktiki [Seas of the Soviet Arctic]. Moscow; Leningrad, Izd-vo Glavsevmorputi, 1948, 416 p. (in Russian).

WMO No. 259 The WMO Sea Ice Nomenclature. Vol. 1. Terminology and Codes. WMO, JCOMM Expert Team on Sea Ice, 2014, 121 p.

Gorbunov Yu.A., Karelin I.D., Kuznecov I.M. et al. Osnovy fiziko-statisticheskih metodov ledovyh prognozov i raschetov dlya arkticheskih morej zablagovremennost'yu do 30 sutok [The Fundamentals of physical and statistical methods of ice forecasting and calculations for the Arctic seas with a lead time of up to 30 days]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1983, 288 p. (in Russian).

Gordienko P.A. Pripajnye l'dy arkticheskih morej [Fast ice of the Arctic seas]. P. I–II. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1971, 172 p. (in Russian).

Gudkovich Z.M., Kirillov A.A., Kovalev K.G. et al. Osnovy metodiki dolgosrochnyh ledovyh prognozov dlya arkticheskih morej [The Fundamentals of the methodology for long-term ice forecasting for the Arctic seas]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1972, 348 p. (in Russian).

Zubov N.N. L’dy Arktiki [Arctic Ice]. Moscow, Izd-vo Glavsevmorputi, 1944, 360 p. (in Russian).

Karelin I.D., Karklin V.P. Pripaj i zapripajnye polyn’i arkticheskih morej sibirskogo shel’fav konce XX – nachale XXI veka [Fast ice and polynyas of the Arctic seas of the Siberian shelf in the late XX–early XXI century]. St. Petersburg, Izd-vo AARI, 2012, 180 p. (in Russian).

Pavlova E.A., Maj R.I., Mironov E.U. et al. Methods of calculating the statistical parameters of fast ice edge distribution. In: Proc. of the III All-Russian Conf. “Hydrometeorology and ecology: achievements and development prospects” (St. Petersburg, Dec. 18–19, 2019). St. Petersburg, Himizdat, 2019, p. 669–672 (in Russian).

Rukovodstvo po proizvodstvy ledovoj aviarazvedki [Guide to the production of ice air surveils]. N.A. Volkov (Ed.). Leningrad, Gidrometizdat, 1981, 239 p. (in Russian).

Divine D.V., Korsnes R., Makshtas A.P. Temporal and spatial variation of shore-fast ice in the Kara Sea. Continental Shelf Res., 2004, vol. 24 (15), p. 1717–1736.

Dmitrenko I.A., Gribanov V.A., Volkov D.L. et al. Impact of river discharge on the fast ice extension in the Russian Arctic shelf area. In: Proc. of the 15th Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC99) (Helsinki, August 23–27, 1999). Helsinki, Finland, 1999, p. 311–321.

Galley R.J., Else B.G.T., Howell S.E.L. et al. Landfast sea ice conditions in the Canadian Arctic: 1983–2009. Arctic, 2012, vol. 65, No. 2, p. 133–144.

Li Z., Zhao J., Su J. et al. Spatial and temporal variations in the extent and thickness of Arctic landfast ice. Remote Sensing, 2020, vol. 12, p. 64.

Lopez-Pintado S., Romo J. On the concept of depth for functional data. J. Amer. Statistical Assoc., 2009, vol. 104, No. 486, p. 718–734.

Mahoney A.R., Eicken H., Gaylord A.G., Shapiro L. Alaska landfast sea ice: Links with bathymetry and atmospheric circulation. J. Geophys. Res., 2007, vol. 112 (C2), C02001.

Mahoney A.R., Eicken H., Gaylord A.G., Gens R. Landfast sea ice extent in the Chukchi and Beaufort Seas: The annual cycle and decadal variability. Cold Regions Sci. and Technol., 2014, vol. 103, p. 41–56.

Ramsay J.O., Silverman B.W. Functional Data Analysis. New York, Springer Verlag, 2005, 429 p.

Selyuzhenok V., Krumpen T., Mahoney A. et al. Seasonal and interannual variability of fast ice extent in the southeastern Laptev Sea between 1999 and 2013. J. Geophys. Res. Oceans, 2015, vol. 120, p. 7791–7806.

Yu Y., Stern H., Fowler C. et al. Interannual variability of Arctic Landfast Ice between 1976 and 2007. J. Climate, 2014, vol. 27, p. 227–243.

URL: http://wdc.aari.ru/datasets (last visited: 01.09.2022).

URL: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/99879-probability-of-polygons-intersection (last visited: 01.09.2022).

Поступила в редакцию 28 сентября 2021 г.,
после доработки – 9 апреля 2022 г.,
принята к публикации 14 сентября 2022 г.