

## КРИОГЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МОРЯХ И ОКЕАНАХ

УДК 551.46+551.32

DOI: 10.15372/KZ20220105

АНАЛИЗ БЛИЖНИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ВРЕМЕННЫХ СВЯЗЕЙ  
В МАССИВЕ ЛЕДОВЫХ ДАННЫХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

В.М. Федоров, Д.М. Фролов

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; fedorov.msu@mail.ru, denisfrolov@mail.ru*

Получены автокорреляционные характеристики многолетних временных рядов ячеек размером  $1^\circ \times 1^\circ$  массива ледовых данных для Северного полушария. Определена временная неоднородность и пространственная анизотропия в многолетней изменчивости площади морских льдов в Северном полушарии. Наиболее тесные связи многолетних месячных значений площади морских льдов характерны для летних месяцев. Более 49 % максимальных значений коэффициента парной корреляции приходится на связь июньских и июльских, а также июльских и августовских многолетних рядов в ячейках массива. Этот эффект является следствием интенсивного и массового летнего таяния морских льдов в Северном полушарии и определяется сходным характером их многолетней изменчивости. Наиболее тесные связи в соседних ячейках массива между многолетними месячными значениями площади морских льдов во все месяцы года отмечаются для широтного направления восток–запад. На него приходится более 87 % всех максимальных значений коэффициента корреляции. Отмеченная анизотропия проявляется на всем пространстве севернее полярного круга. Причина этого эффекта определяется особенностями сезонного образования (преимущественно от высоких широт к низким) и таяния морских льдов (от низких широт к высоким), связанными с сезонным изменением инсоляции и сходной направленностью многолетних изменений площади морских льдов, определяемой изменением меридионального градиента инсоляции. Другой причиной может быть преимущественно меридиональный дрейф морских льдов в Северном Ледовитом океане. Определены районы с высоким и низким уровнем ближних пространственных и временных связей в динамике площади морских льдов в Северном полушарии.

**Ключевые слова:** *площадь морских льдов, Северное полушарие, динамика, пространственные и временные связи, пространственная неоднородность, пространственная анизотропия.*

ANALYSIS OF SHORT-RANGE SPATIAL AND TEMPORAL RELATIONSHIPS  
IN THE ICE DATA SET FOR NORTHERN HEMISPHERE

V.M. Fedorov, D.M. Frolov

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, Moscow,  
119991, Russia; fedorov.msu@mail.ru, denisfrolov@mail.ru*

Autocorrelation characteristics of long-term time series of cells with the size of  $1^\circ \times 1^\circ$  of the sea ice area data array for the Northern Hemisphere are obtained. The temporal heterogeneity and spatial anisotropy in long-term variability of the sea ice area in the Northern Hemisphere are determined. The closest relationships between long-term monthly values of the sea ice area are typical for summer months. More than 49 % of maximum values of pair correlation coefficient are due to the connection of June and July, as well as July and August multi-year series in the array cells. This effect is a consequence of intense and massive summer melting of sea ice in the Northern Hemisphere and similarity of their long-term variability. The closest relationships in the neighboring cells of the array between the long-term monthly values of the sea ice area in all months of the year are noted for the east – west latitudinal direction. It accounts for more than 87 % of all maximum values of correlation coefficient. Spatial anisotropy is revealed throughout the entire area to the north of the Arctic Circle. The reason for this effect is determined by the features of sea ice seasonal formation (mainly from high latitudes to low latitudes) and melting (from low latitudes to high latitudes). These features are associated with seasonal changes in insolation. Long-term changes in sea ice area have similar direction and are determined by changes in meridional gradient of insolation. Another reason may be mainly meridional direction of sea ice drift in the Arctic Ocean. Areas with high and low levels of short-range spatial and temporal relationships in sea ice area dynamics in the Northern Hemisphere are determined.

**Key words:** *sea ice area, Northern Hemisphere, dynamics, spatial and temporal relationships, spatial heterogeneity, spatial anisotropy.*

## ВВЕДЕНИЕ

Важным параметром ледяного покрова является его площадь, которая изменяется как в пространстве, так и во времени. Изучение изменений площади морских льдов и причин, их вызывающих, составляет одну из актуальных задач морского ледоведения [Захаров, 1976; Морской лед, 1997]. Распространение морских льдов зависит от многих факторов, определяемых геофизическими процессами. Это прежде всего температура и влажность воздуха, температура поверхности океана, циркуляционные процессы в атмосфере, морские течения, наличие и структура галоклина, облачность, сток рек, альбедо и др. Основу указанных факторов составляет приходящая к Земле солнечная радиация – главный источник энергии гидрометеорологических процессов [Шулейкин, 1953; Кондратьев, 1980, 1992; Монин, 1982]. Следствием нерегулярности поступления во времени и неравномерного распределения в пространстве солнечной радиации являются механизмы теплообмена – “тепловая машина первого и второго рода” [Шулейкин, 1953]. Из-за неоднородности компонентов природной среды образуются механизмы теплообмена между атмосферой, океаном и морским льдом. Морские льды представляют собой динамический компонент природной среды, для которого характерна сезонная, межгодовая и многолетняя изменчивость. Целью работы является анализ близких пространственных и временных связей в массиве ледовых данных для определения закономерностей в многолетней изменчивости площади морских льдов.

Массив HadISST1 [<http://www.metoffice.gov.uk/hodobs/hgdisst/data/download.html>], содержащий данные о средней месячной температуре поверхности океана (ТПО) и площади морских льдов (начиная с конца XIX в. по настоящее время), может стать основой для исследований современного климата и динамики морских льдов (индикаторов климата) с большим пространственным разрешением. Эта база данных также может быть использована для уточнения моделей прогноза распространения морских льдов. Поэтому массив HadISST1 представляет собой большую научную ценность. Однако в нем определенно имеются недостатки, связанные как с отсутствием исходных данных по некоторым регионам и периодам времени, так и с методами расчетов, интерполяции и экстраполяции данных [Rayner et al., 2003]. В связи с этим определение репрезентативных маркеров (корреляционных характеристик) близких связей для уточнения и корректировки ледовых данных представляется актуальной геофизической задачей.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследований использовалась база данных Метеорологического центра Хедли (Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, UK) HadISST1 (Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set). Представленная в базе данных HadISST1 информация о средней месячной температуре поверхности океана и площади морских льдов в Северном и Южном полушариях получена в результате сведения в единый массив данных реанализа (ERA40), выполненного с использованием эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) и данных инструментальных и визуальных (прежде всего судовых и спутниковых) наблюдений. Реконструкция площади морских льдов в массиве по сетке  $1^\circ \times 1^\circ$  выполнена на основе алгоритмов аппроксимации и экстраполяции доступных данных (оцифрованные карты площади морских льдов, данные судовых и спутниковых наблюдений) с учетом температуры поверхности океана (ТПО) [Rayner et al., 2003].

В массиве представлены данные по средней месячной площади морских льдов в пространственной ячейке  $1^\circ \times 1^\circ$  в процентах от площади ячейки (ледовитость), с 1870 г. по настоящее время. В работе авторами проанализированы данные за период 1978–2018 гг. (период спутниковых наблюдений) по Северному полушарию. Рассматриваемый (для этого периода) массив охватывает около 7400 ячеек в Северном полушарии. В каждой ячейке представлена информация по ледовитости с месячным разрешением.

Оценка и значимость линейного коэффициента корреляции при выполнении корреляционного анализа определялась в соответствии с существующими методиками [Закс, 1976]. Стандартная ошибка коэффициента корреляции определяется формулой

$$m_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}},$$

где  $r$  – выборочный коэффициент корреляции;  $n$  – объем выборки.

Статистическая значимость линейного коэффициента корреляции определяется с использованием критерия Стьюдента, фактическое значение которого находится по формуле

$$t_{\text{факт}} = \frac{|r|}{m_r}.$$

Выводы о существенности  $r$  делаются на основе сопоставления  $t_{\text{факт}}$  и  $t_{\text{кр}}(\alpha, n-2)$  – критического (табличного) значения  $t$ -распределения (здесь  $\alpha$  – уровень значимости,  $(n-2)$  – число степеней

свободы). Коэффициент корреляции признается статистически значимым, если выполняется условие  $t_{\text{факт}} > t_{\text{кр}}$ . В противном случае он статистически незначим.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Анализ временных связей.** Для определения временных связей проводился корреляционный анализ связи многолетних месячных значений площади морских льдов. Рассчитывалась корреляция между многолетними значениями (временными рядами, охватывающими период с 1978 по 2018 г.) смежных последовательных месяцев в каждой ячейке. Ряд январских значений площади морских льдов в ячейке коррелировался с рядом февральских значений и т. д. Декабрьские значения площади морских льдов коррелировались с январскими значениями. Для каждой ячейки находилось среднее значение (по значениям коэффициента корреляции, полученным по парной корреляции для всех 12 месяцев года) (рис. 1).

Высокие (в среднем для месяца) значения коэффициента корреляции отмечаются для Баренцева и Гренландского морей, Девисова пролива и восточной части Охотского моря. Было проанализировано также распределение максимальных значений коэффициента корреляции (рис. 2).

Максимальные значения коэффициентов парной корреляции (для отдельных месяцев), превышающие 0.65, отмечаются на большей площади Северной полярной области. Наиболее тесная ( $R > 0.8$ ) связь для отдельных месяцев проявляется в Гренландском и Баренцевом морях, в Восточно-Сибирском и Чукотском морях, в море Бофорта, Гудзоновом заливе, Девисовом проливе и в северной части моря Баффина.

Таблица 1. Распределение максимальных значений коэффициента парной корреляции (%)

Месяцы	Коэффициент корреляции
Январь–февраль	3.567
Февраль–март	1.953
Март–апрель	5.775
Апрель–май	4.352
Май–июнь	5.843
Июнь–июль	34.650
Июль–август	14.374
Август–сентябрь	6.879
Сентябрь–октябрь	9.023
Октябрь–ноябрь	7.282
Ноябрь–декабрь	2.272
Декабрь–январь	6.030

Анализ показывает, что большинство максимальных значений коэффициента корреляции отмечается для связи многолетних рядов июня и июля, а также июля и августа (табл. 1). Таким образом, на летний сезон приходится 49.024 % максимальных значений коэффициента корреляции. Отмеченный эффект тесной связи площади морских льдов внутри ячеек в летний сезон, очевидно, является следствием активного и массового таяния морских льдов, определяемого максимумом сезонной инсоляции [Федоров, 2018], его закономерной направленностью – последовательным сокращением площади морского льда от июня к июлю и августу. Таким образом, площадь морского льда в июле в значительной степени определяется его площадью в июне. Период интенсивного (массового) таяния льда связан с тем, что он приходится на время летнего солнцестояния. В это время отмечается сезонный максимум притока тепла от солнечной радиации для Северного полу-

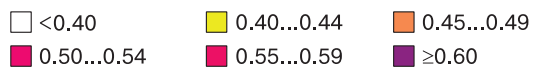
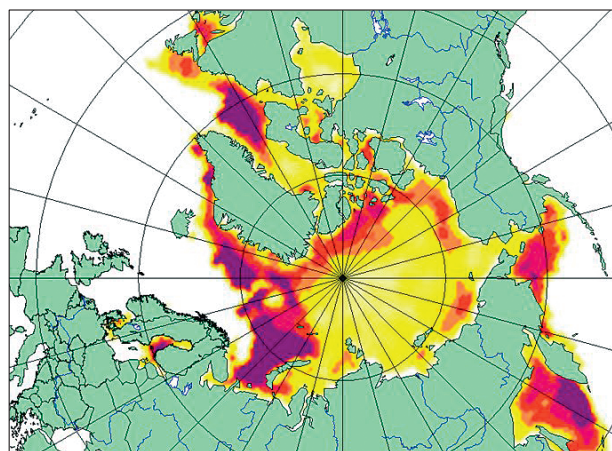


Рис. 1. Распределение среднего для ячейки значения коэффициента корреляции.

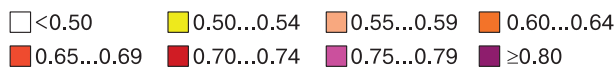
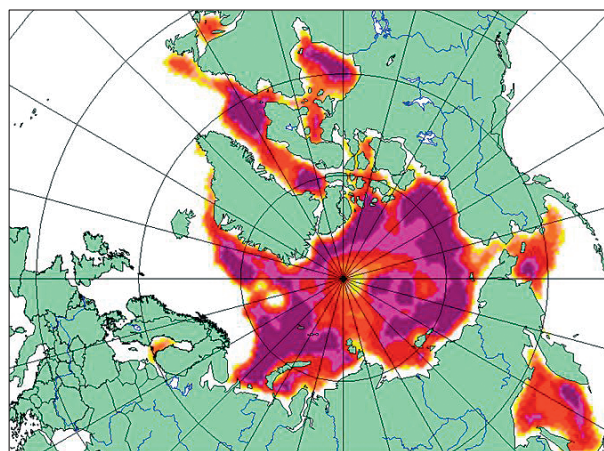


Рис. 2. Распределение максимальных значений коэффициента корреляции.

шария. Ранее эффект тесной связи ледовитости в летние месяцы в масштабах морей отмечался для Баренцева [Захаров, Малинин, 2000] и других морей Российской Арктики [Морской лед, 1997; Ледяные образования..., 2006; Федоров, 2015; Федоров и др., 2020]. Однако такая летняя связь в значительной степени сохраняется в Северной полярной области и в масштабе ячеек размером  $1^\circ \times 1^\circ$ .

Анализ временных связей в массиве ледовых данных HadISST1 показывает, что максимальные значения коэффициента корреляции характерны для связи многолетних месячных рядов летних месяцев (июня и июля, июля и августа), отражающих время интенсивного и массового сокращения площади морских льдов в полушарии. Проведенные ранее исследования показали, что многолетние изменения площади морских льдов связаны с изменением меридионального градиента инсоляции (МГИ), регулирующего меридиональный перенос тепла в системе океан–атмосфера. В настоящее время МГИ увеличивается в летнее полугодие в обоих полушариях. С увеличением МГИ связана многолетняя тенденция сокращения площади морских льдов в летний период (преимущественно в меридиональном направлении). Также известно, что годовые изменения площади морских льдов определяются их изменениями в летнее полугодие [Федоров, 2015, 2018, 2019, 2020; Федоров и др., 2020; Федоров, Гребенников, 2021]. Таким образом, многолетние изменения площади морских льдов связаны с многолетними изменениями меридионального градиента инсоляции.

**Анализ пространственных связей.** Для определения пространственных закономерностей в распределении ледовых данных для каждого месяца анализировались связи между многолетними рядами соседних ячеек массива. Были получены значения коэффициента корреляции по соседним ячейкам для многолетних (1978–2018) рядов всех 12 месяцев года. Затем находились средние для каждого месяца значения коэффициента корреляции с соседними ячейками и максимальные значения коэффициента корреляции. Для марта – периода максимального развития площади морских льдов – распределение средних и максимальных значений коэффициента корреляции приведено на рис. 3, 4.

Следует отметить, что белые пятна на значительной площади Арктического бассейна (см. рис. 3, 4) связаны с ограниченностью корреляционного анализа. Коэффициент корреляции не рассчитывается, если хотя бы один из временных рядов состоит из одинаковых значений переменной. Например, месячные значения площади морских льдов, равные 100 % площади ячейки, характерны для большой территории Арктического бассейна за период 1978–2018 гг.

Наиболее тесные ближние связи по среднему значению коэффициента корреляции в марте отмечаются в Баренцевом и Гренландском морях, в Охотском и Беринговом морях, Девисовом проливе и Гудзоновом заливе. В этих же районах локализованы и максимальные значения коэффициента корреляции мартовских временных рядов соседних ячеек.

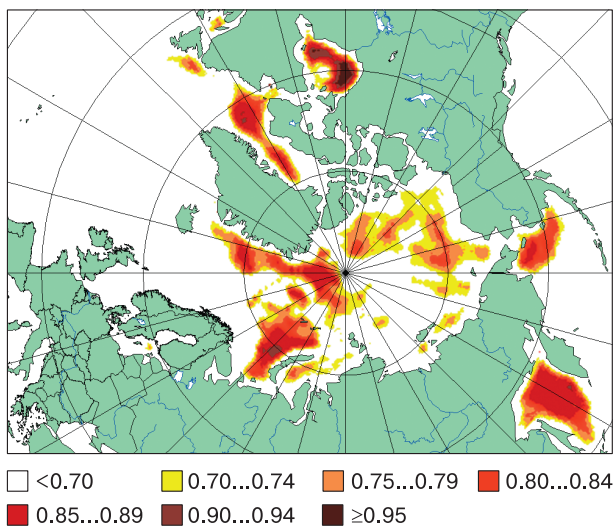


Рис. 3. Распределение средних значений коэффициента корреляции между многолетними значениями площади морских льдов в соседних ячейках в марте.

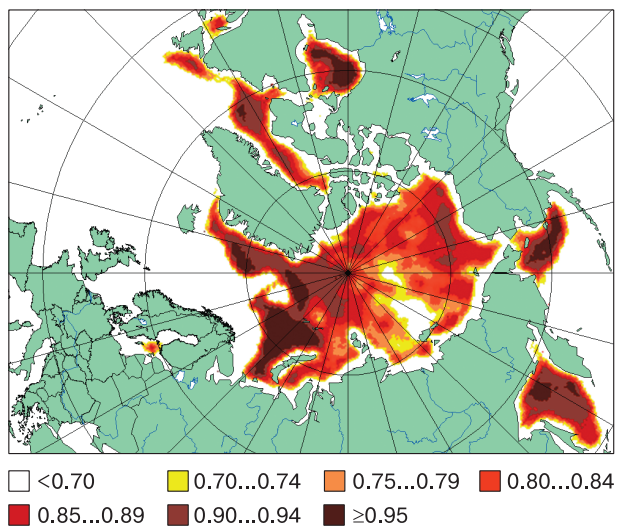
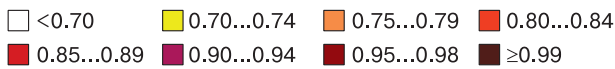
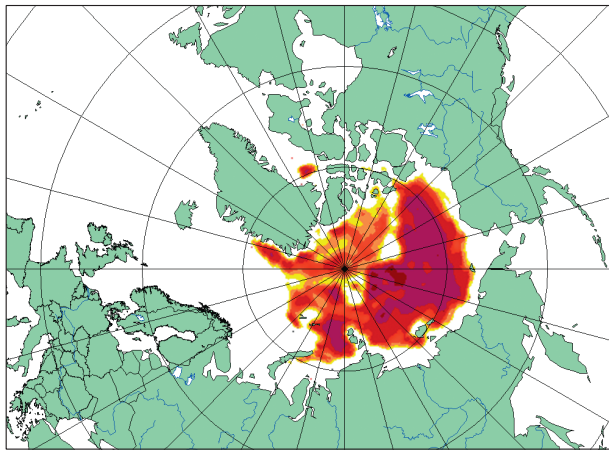
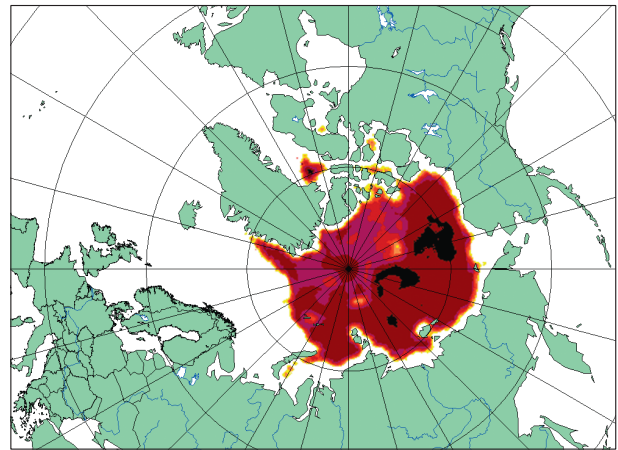


Рис. 4. Распределение максимальных значений коэффициента корреляции между многолетними значениями площади морских льдов в соседних ячейках в марте.



**Рис. 5.** Распределение средних значений коэффициента корреляции между многолетними значениями площади морских льдов в соседних ячейках в сентябре.



**Рис. 6.** Распределение максимальных значений коэффициента корреляции между многолетними значениями площади морских льдов в соседних ячейках в сентябре.

**Таблица 2.** Распределение средних значений коэффициента корреляции (%) по всем четырем направлениям корреляции многолетних значений площади морских льдов по месяцам года

Коэффициент корреляции	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
<-0.9	0	0	0	0	0	0
<-0.8	0	0	0	0	0	0
<-0.7	0	0	0	0	0	0
<-0.6	0	0	0	0	0	0
<-0.5	0	0	0	0	0	0
<0.0	0.292	0.416	0.454	0.218	0.256	0.253
≥0.0	99.708	99.584	99.546	99.782	99.744	99.747
>0.5	91.066	87.949	86.420	89.714	90.670	93.631
>0.6	80.816	74.710	75.271	81.098	82.122	87.753
>0.7	62.948	52.065	55.582	65.161	66.712	73.352
>0.8	31.379	25.765	29.065	36.263	38.676	44.233
>0.9	7.677	6.672	7.706	7.874	7.299	9.537
	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
<-0.9	0	0	0	0	0	0
<-0.8	0	0	0	0	0	0
<-0.7	0	0	0	0	0	0
<-0.6	0.017	0	0	0	0	0
<-0.5	0.017	0	0	0	0	0
<0.0	0.249	0.268	0.221	0.212	0.181	0.201
≥0.0	99.751	99.732	99.779	99.788	99.819	99.799
>0.5	93.384	93.091	95.375	94.893	96.844	95.090
>0.6	86.652	88.716	91.542	89.609	92.685	87.355
>0.7	74.250	79.486	81.739	77.028	80.618	70.882
>0.8	49.859	58.615	61.452	54.586	51.849	38.814
>0.9	12.602	17.693	25.705	28.945	15.650	9.650

Распределение характера ближних корреляционных связей в сентябре (период минимального распространения площади морских льдов) приведено на рис. 5, 6.

В сентябре площадь, на которой проявляется тесная (в среднем для соседних ячеек) связь, возрастает по сравнению с мартом. Увеличиваются также средние и максимальные значения коэффициента корреляции (табл. 2).

Корреляционный анализ ближних пространственных связей (между многолетними значениями площади морских льдов в соседних ячейках) проводился по четырем возможным направлениям. Средние значения коэффициента корреляции по всем направлениям представлены в табл. 2. Направления образуются естественным путем при расчетах корреляции значений площади льдов в произвольно выбранной ячейке с данными соседних ячеек. Если выбранная ячейка не расположена на границе массива, то возможна корреляция с данными, принадлежащими ячейкам, примыкающим к выбранной ячейке с востока, запада, севера, юга, северо-востока, северо-запада, юго-востока и юго-запада. Таким образом, при расчетах коэффи-

циента корреляции для ячеек всего массива данных образуются четыре направления: север–юг (С–Ю), восток–запад (В–З), юго–запад–северо–восток (ЮЗ–СВ) и юго–восток–северо–запад (ЮВ–СЗ).

Все значения коэффициента корреляции, превышающие 0.5 (по модулю), статистически значимы с вероятностью 0.99.

В среднем по всем 12 месяцам число отрицательных значений составляет 0.271 %, положительных – 99.729 %. Значение коэффициента корреляции, равное нулю, считалось положительным. То есть многолетние ряды месячных значений в соседних ячейках связаны в основном положительной связью. Тесноту связи для средних по 12 месяцам значениям (среднегодовая связь) характеризует распределение значений коэффициента корреляции более: 0.5 – 92.167 %, 0.6 – 84.490 %, 0.7 – 69.354 %, 0.8 – 42.515 %, 0.9 – 12.567 %.

Также были найдены максимальные значения коэффициента корреляции многолетней площади морских льдов в соседних ячейках по всем 12 месяцам года (табл. 3).

Таблица 3. Распределение максимальных значений коэффициента корреляции (%) по всем четырем направлениям корреляции многолетних значений площади морских льдов по месяцам года

Коэффициент корреляции	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
<-0.9	0	0	0	0	0	0
<-0.8	0	0	0	0	0	0
<-0.7	0	0	0	0	0	0
<-0.6	0	0	0	0	0	0
<-0.5	0	0	0	0	0	0
<0.0	0.263	0.342	0.337	0.174	0.196	0.174
≥0.0	99.737	99.658	99.663	99.826	99.804	99.826
>0.5	97.894	97.058	97.319	98.155	98.104	98.669
>0.6	96.169	94.651	94.873	96.760	96.569	97.734
>0.7	92.733	88.172	88.881	94.348	93.920	95.722
>0.8	82.351	72.363	75.227	87.476	87.901	91.461
>0.9	49.715	40.401	44.843	58.492	67.825	69.946
	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
<-0.9	0	0	0	0	0	0
<-0.8	0	0	0	0	0	0
<-0.7	0	0	0	0	0	0
<-0.6	0.017	0	0	0	0	0
<-0.5	0.017	0	0	0	0	0
<0.0	0.199	0.232	0.221	0.141	0.148	0.154
≥0.0	99.801	99.768	99.779	99.859	99.852	99.846
>0.5	98.690	98.643	98.987	98.975	98.767	98.441
>0.6	97.795	97.893	98.342	98.180	98.109	97.545
>0.7	95.772	96.215	97.586	96.766	96.827	95.384
>0.8	89.653	92.805	94.620	92.437	93.276	89.795
>0.9	69.972	81.182	83.269	77.576	74.667	61.603

Таблица 4. Распределение максимальных значений коэффициента корреляции (%) по отдельным направлениям и месяцам года

Направление корреляции	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
ЮЗ–СВ	6.697	7.370	6.944	5.085	4.289	3.755
С–Ю	6.068	7.370	6.827	4.794	3.777	2.963
ЮВ–СЗ	4.708	5.423	5.054	3.225	2.950	2.725
В–З	82.527	79.837	81.175	86.895	88.984	90.558
	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
ЮЗ–СВ	4.195	3.910	3.575	4.312	3.600	4.987
С–Ю	3.034	2.464	2.727	2.598	3.156	3.999
ЮВ–СЗ	3.200	2.392	2.193	2.739	2.828	3.505
В–З	89.571	91.234	91.505	90.352	90.416	87.510

В среднем по 12 месяцам для максимальных значений коэффициента корреляции значения  $<0.0$  составляют 0.217 %, значения  $\geq 0.0$  составляют 99.783 %. Максимальную тесноту связи, среднюю по 12 месяцам (среднегодовая связь), характеризует распределение значений коэффициента корреляции более: 0.5 – 98.270 %, 0.6 – 96.975 %, 0.7 – 94.189 %, 0.8 – 87.049 %, 0.9 – 64.010 %.

Как уже отмечалось, возможны всего четыре направления корреляции. Распределение максимальных значений коэффициента корреляции по направлениям и месяцам года представлено в табл. 4.

В среднем по месяцам за год для направления ЮЗ–СВ получается 4.969 %, С–Ю – 4.254 %, ЮВ–СЗ – 3.254 % и для В–З – 87.305 % максимальных значений коэффициента корреляции. Таким образом, проявляется пространственная анизотропия в корреляции массива ледовых данных, которая выражается значительным преобладанием распределения максимальных значений коэф-

фициента корреляции по широтному направлению В–З для всех месяцев года.

Исследовалось распределение максимальных значений коэффициента корреляции, полученных для года (осреднением месячных значений) по широтным зонам с разрешением в  $1^\circ$  широты (рис. 7). Распределение представлено в процентах от общего количества значений коэффициента корреляции, полученных по всем направлениям корреляции для всего массива ледовых данных.

Преобладание широтного направления в пространственном распределении максимальных значений коэффициента корреляции многолетних месячных значений площади морских льдов в соседних ячейках массива отмечается на всем пространстве севернее полярного круга. Основная причина этого эффекта связана с сезонным образованием льда (от северных широт к южным) и сезонным таянием морских льдов (от южных широт к северным), регулируемые сезонным изменением инсоляции (или радиационного тепла).

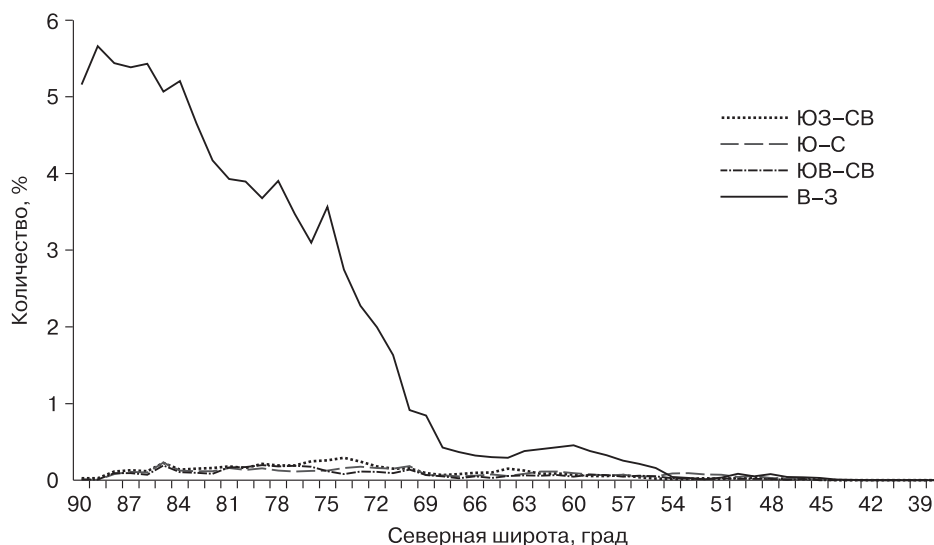


Рис. 7. Распределение максимальных значений коэффициента корреляции по 1-градусным широтным зонам.

Многолетние изменения площади морских льдов (связанные с изменением процессов образования и таяния) определяются изменением меридионального градиента инсоляции, регулирующим интенсивность меридионального переноса радиационного тепла, работу “тепловой машины первого рода”. Изменение меридионального градиента инсоляции связано с изменением наклона оси вращения Земли [Федоров, 2018, 2019, 2020; Федоров, Гребенников, 2021]. Другой причиной отмеченного эффекта может быть преимущественно меридиональный дрейф морских льдов в Северном Ледовитом океане, определяемый характером морских течений и направлением ветров [Зубов, 1938; Захаров, 1976; Климатический режим..., 1991; Морской лед, 1997]. Таким образом, именно меридиональные изменения в переносе радиационного тепла и преимущественно меридиональное направление дрейфа морских льдов являются причиной найденной зональной анизотропии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Корреляционный анализ временных связей в массиве ледовых данных позволил определить, что наиболее тесные связи многолетних месячных значений площади морских льдов характерны для июня и июля, июля и августа. Около половины (более 48 %) максимальных значений коэффициента корреляции между площадью морских льдов в ячейках Северного полушария отмечается в летний период (июнь–август). Этот эффект определяется интенсивным и массовым сезонным таянием морских льдов в Северном полушарии, которое связано с максимальным поступлением тепла от солнечной радиации. Сезонные изменения площади морских льдов проявляются и в характере многолетних изменений, наиболее тесно связанных в ячейках в летний период. Однако многолетние изменения определяются в основном изменением летнего меридионального градиента инсоляции.

Корреляционный анализ пространственных связей показал, что наиболее тесные связи для всех месяцев года между многолетними месячными значениями характерны для широтного направления восток–запад. На него приходится более 87 % всех максимальных значений коэффициента корреляции. Анизотропия отмечается на всем пространстве севернее полярного круга и определяется меридиональным направлением сезонного образования и таяния морских льдов, связанным с сезонным меридиональным изменением инсоляции (солнечной радиации). Сезонный характер пространственной изменчивости площади морских льдов проявляется и в сходной динамике многолетних изменений. Многолетние изменения площади морских льдов определяются многолетними изменениями меридионального градиента

инсоляции, регулирующим интенсивность меридионального переноса радиационного тепла из экваториальной области в полярные районы. Другой причиной пространственной анизотропии, вероятно, является преимущественно меридиональное направление дрейфа в Северном Ледовитом океане.

Определены районы с высоким и низким уровнем близких пространственных и временных связей в динамике площади морских льдов в Северном полушарии. Полученные автокорреляционные характеристики могут учитываться при интерполяции и экстраполяции данных площади морских льдов и тем самым способствовать уточнению массива ледовых данных. Полученные результаты – региональные особенности близких пространственных и временных связей – также могут учитываться при статистическом и физико-математическом моделировании динамики площади морских льдов в Северном полушарии.

**Благодарности.** Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой “Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики” (121051100167-1), “Опасность и риск природных процессов и явлений” (121051300175-4) и “Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии” (121051100164-0).

### Литература

- Закс Л.** Статистическое оценивание. М., Статистика, 1976, 598 с.
- Захаров В.Ф.** Похолодание Арктики и ледяной покров Арктических морей // Тр. ААНИИ. Л., Гидрометеоздат, 1976, т. 337, 96 с.
- Захаров В.Ф.** Морские льды и климат / В.Ф. Захаров, В.Н. Малинин. СПб., Гидрометеоздат, 2000, 92 с.
- Зубов Н.Н.** Морские воды и льды. М., Гидрометеоздат, 1938, 454 с.
- Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв.** / Под ред. Б.А. Крутских. Л., Гидрометеоздат, 1991, 200 с.
- Кондратьев К.Я.** Радиационные факторы современных изменений глобального климата. Л., Гидрометеоздат, 1980, 279 с.
- Кондратьев К.Я.** Глобальный климат. СПб., Наука, 1992, 359 с.
- Ледяные образования морей западной Арктики** / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб., ААНИИ, 2006, 272 с.
- Монин А.С.** Введение в теорию климата. Л., Гидрометеоздат, 1982, 246 с.
- Морской лед** / Под ред. И.Е. Фролова, В.П. Гаврило. СПб., Гидрометеоздат, 1997, 402 с.
- Федоров В.М.** Тенденции изменения площади морских льдов в Северном полушарии и их причины // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 3, с. 52–64.
- Федоров В.М.** Солнечная радиация и климат Земли. М., Физматлит, 2018, 232 с.



**Федоров В.М.** Проблема меридионального переноса тепла в астрономической теории климата // Геофиз. процессы и биосфера, 2019, т. 18, № 3, с. 117–128.

**Федоров В.М.** Эволюция современного глобального климата Земли и ее возможные причины // ГеоРиск, 2020, т. XIV, № 4, с. 16–29.

**Федоров В.М., Гребенников П.Б., Фролов Д.М.** Анализ откликов в динамике площади морских льдов отдельных районов Арктики на изменение инсоляции // Арктика и Антарктика, 2020, № 2, с. 17–33.

**Федоров В.М., Гребенников П.Б.** Многолетняя динамика площади морских льдов в Северном полушарии в связи с изменениями характеристик инсоляции // Криосфера Земли, 2021, т. XXV, № 2, с. 38–47.

**Шулейкин В.В.** Физика моря. М., АН СССР, 1953, 990 с.

**Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B. et al.** Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // J. Geophys. Res., 2003, vol. 108, No. D14, p. 4407.

**URL:** <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html> (дата обращения: 25.02.2021).

## References

Zaks L. Statisticheskoe ocenivanie [Statistical Evaluation]. Moscow, Statistika, 1976, 598 p. (in Russian).

Zakharov V.F. Pokholodaniye Arktiki i ledyanoy pokrov Arkticheskikh morey [Cooling of the Arctic and the ice cover of the Arctic Seas]. Trudy AANII. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1976, vol. 337, 96 p. (in Russian).

Zakharov V.F., Malinin V.N. Morskie l'dy i klimat [Sea Ice and Climate]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2000, 92 p. (in Russian).

Zubov N.N. Morskie vody i l'dy [Sea Water and Sea Ice]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1938, 454 p. (in Russian).

Krutskikh B.A. (Ed.). Klimaticheskij rezhim Arktiki na rubezhe XX i XXI vv [Climate Regime of the Arctic at the Turn of the XX and XXI Centuries]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991, 200 p. (in Russian).

Kondratiev K.Ya. Radiatsionnye faktory sovremennykh izmeneniy global'nogo klimata [Radiation Factors of Modern

Changes in the Global Climate]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980, 279 p. (in Russian).

Kondratiev K.Ya. Global'nyy klimat [Global Climate]. St. Petersburg, Nauka, 1992, 359 p. (in Russian).

Zubakin G.K. (Ed.). Ledyanye obrazovaniya morej zapadnoj Arktiki [Ice Formations in the Western Arctic Seas]. St. Petersburg, AARI, 2006, 272 p. (in Russian).

Monin A.S. Vvedeniye v teoriyu klimata [Introduction to the Theory of Climate]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1982, 246 p. (in Russian).

Frolov I.E., Gavrilov V.P. (Eds.). Morskoj led [Sea Ice]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1997, 402 p. (in Russian).

Fedorov V.M. Trends of the changes in sea ice extent in the Northern Hemisphere and their causes. Earth's Cryosphere, 2015, vol. XIX, No. 3, p. 46–57.

Fedorov V.M. Solnechnaya radiatsiya i klimat Zemli [The Earth's Insolation and Recent Climate Changes]. Moscow, Fizmatlit, 2018, 232 p. (in Russian).

Fedorov V.M. The problem of meridional heat transport into the astronomical climate theory. Geofizicheskie Protssesy i Biosfera [Geophysical Processes and Biosphere], 2019, vol. 18, No. 3, p. 117–128 (in Russian).

Fedorov V.M. Evolution of the modern global climate of the Earth and its possible causes. GeoRisk, 2020, vol. XIV, No. 4, p. 16–29 (in Russian).

Fedorov V.M., Grebennikov P.B., Frolov D.M. Analysis of responses in the dynamics of the sea ice area of individual regions of the Arctic to changes in insolation. Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctica], 2020, No. 2, p. 17–33 (in Russian).

Fedorov V.M., Grebennikov P.B. Implications of changes in insolation characteristics for long-term sea ice extent dynamics in the Northern Hemisphere. Earth's Cryosphere, 2021, vol. XXV, No. 2, p. 35–43.

Shuleikin V.V. Fizika morya [Sea Physics]. Moscow, AN SSSR, 1953, 990 p. (in Russian).

Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B. et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. J. Geophys. Res., 2003, vol. 108, No. D14, 4407, 10.1029/2002JD002670.

**URL:** <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html> (last visited: 25.02.2021).

*Поступила в редакцию 26 февраля 2021 г.,  
после доработки – 27 декабря 2021 г.,  
принята к публикации 4 января 2022 г.*