КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 3, с. 38–50 **http://www.izdatgeo.ru**

КРИОГЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МОРЯХ И ОКЕАНАХ

УДК 551.46+551.32 DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-3(38-50)

ОЦЕНКА РОЛИ ИНСОЛЯЦИОННОГО ФАКТОРА В ИЗМЕНЕНИЯХ ПЛОЩАДИ МОРСКИХ ЛЬДОВ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

В.М. Федоров, П.Б. Гребенников, Д.М. Фролов

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

На основе корреляционного и регрессионного анализа получена оценка роли инсоляционного фактора в сезонных, межгодовых и многолетних региональных и общих для российской Арктики изменениях площади морских льдов за период спутниковых наблюдений (1979–2018 гг.). В многолетних изменениях годовых и месячных значений площади морских льдов связь с многолетними изменениями инсоляционной контрастности уменьшается при увеличении пространственного масштаба. В годовом ходе отмечена более тесная и стабильная связь сезонных изменений площади морских льдов и сезонных изменений инсоляции (смещена по фазе на три месяца в прошлое). С годовым ходом смещенной по фазе инсоляции также тесно связаны сезонные вариации амплитуды межгодовой изменчивости площади морских льдов, распределение коэффициента детерминации в регрессионных моделях и сезонные сокращения площади морских льдов. Консервативными относительно инсоляционного фактора являются моря центральной части российской Арктики (Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское). Наиболее заметный отклик на изменения инсоляции и инсоляционной контрастности отмечается в окраинных морях (Баренцево и Чукотское). При этом характер отклика на инсоляционный фактор в этих районах существенно различается.

Моря российской Арктики, площадь морских льдов, сезонная, межгодовая и многолетняя изменчивость, инсоляция, инсоляционная контрастность, корреляционный и регрессионный анализ

EVALUATION OF THE EFFECT OF INSOLATION FACTOR ON SEA ICE EXTENT VARIABILITY IN THE RUSSIAN ARCTIC

V.M. Fedorov, P.B. Grebennikov, D.M. Frolov

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

Application of the correlation and regression analysis which enabled evaluation of the role of insolation factor in seasonal, interannual, longterm variations (including those unified for the Russian Arctic) of sea ice extent during the period of satellite observations (1979–2018) is discussed. The revealed correlation between long-term variations of annual and monthly values of sea ice extent and long-term variations of insolation contrast decreases with increasing spatial scale. The annual course is marked by a more stable and close relationship between seasonal changes in sea ice extent and seasonal variations of insolation (with phase shift for three months back). Annual variations of the phase shifted insolation also have a close connection with the seasonal variability amplitude of interannual variation of sea ice extent, with distribution of the coefficient of determination in regression models, and with seasonal changes in sea ice extent decline. The seas in central part of the Russian Arctic (Kara Sea, Laptev Sea and East Siberian Sea) are interpreted as the most conservative relative to the insolation factor, while the most remarkable response to variations of insolation and insolation contrast are reported from the marginal seas (Barents Sea and Chukchi Sea). Patterns of response to the insolation factor also differ considerably for these regions.

Russian Arctic seas, sea ice extent, annual, interannual and long-term variation, insolation, insolation contrast, correlation and regression analysis

ВВЕДЕНИЕ

Морской лед является важным компонентом криосферы и климатической системы Земли. Роль морских льдов в изменении климата определяется прежде всего их участием в механизмах теплообмена между океаном и атмосферой. Распространение морского льда имеет и большое практическое значение как для судоходства по Северному морскому пути, так и для его транспортной инфраструктуры, условий добычи и транспортировки добываемых на арктическом шельфе полезных ископаемых. Этим определяется необходимость объяснения наблюдаемого сокращения площади мор-

© В.М. Федоров, П.Б. Гребенников, Д.М. Фролов, 2020

ских льдов, поиска причин отмечаемой тенденции, прогнозирования изменения площади морских льдов в российской Арктике и его последствий. С этой целью авторами проведены исследования динамики площади морских льдов в Северном Ледовитом океане (СЛО), в российской Арктике в целом и в отдельных морях региона. Исследовались сезонные (годовой ход), межгодовые и многолетние изменения площади морских льдов в российской Арктике и в морях Баренцевом, Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском в связи с изменением инсоляции и инсоляционной контрастности (ИК) в Северном полушарии. Основная задача работы – проанализировать связь инсоляции и ИК в Северном полушарии и площади морских льдов в российской Арктике в разных пространственных и временных масштабах.

Льды занимают около 6 % поверхности Земли или ~30 млн км^2. Основная масса льдов располагается в Арктике и Антарктике. В Северном материковом полушарии на льды суши приходится всего 20 % общей площади оледенения Арктики, остальные 80 % – на морские льды [*Корякин, 1988*]. Сезонные изменения в оледенении суши и морей в Арктике в настоящее время происходят на площади 10–17 млн км^2. Летом площадь морских льдов сокращается примерно вдвое. В морях российской Арктики морской лед в марте (суммарно по пяти морям) в среднем занимает площадь 472 тыс. км^2, в сентябре – около 160 тыс. км^2 (рис. 1).

Развитие ледяного покрова происходит под действием термических и динамических атмосферных и океанических процессов различных масштабов [*Зубов, 1938; Бурке, 1940; Морской лед, 1997; Ледяные образования..., 2006*]. Приповерхностная температура воздуха (ПТВ) и температура поверхности океана (ТПО) в годовом ходе в основном связаны с инсоляцией. Многолетние изменения ПТВ и ТПО во многом определяются изменением ИК [*Федоров, 2015, 2018; Федоров, Гребенников, 2018*]. Инсоляционная контрастность – это разность между годовой инсоляцией области, являющейся источником тепла (0–45° широты), и областью стока тепла (45–90° широты) в полушариях. Обобщенно ИК (по областям источника и стока тепла) отражает изменение меридионального градиента инсоляции, которым регулируется меридиональный перенос тепла в системе океан–атмосфера [*Федоров, 2018, 2019а,б*].

Важным параметром ледяного покрова является его площадь. С течением времени эта площадь испытывает изменения, наиболее масштабными из которых являются сезонные, межгодовые и многолетние. Изучение самих изменений и причин, их вызывающих, составляет одну из актуальных задач криолитологии и морского ледоведения [*Зубов, 1938; Захаров, 1981; Морской лед, 1997; Захаров, Малинин, 2000; Алексеев и др., 2015; Шалина, Бобылев, 2017*].

С 1979 г. ведутся спутниковые наблюдения за изменением площади морских льдов в Северном Ледовитом океане (рис. 2) [*Fetterer et al., 2017*].

Значение коэффициента корреляции многолетних изменений ИК со среднегодовой площадью морских льдов в СЛО составляет –0.920, с максимальной и минимальной площадью равно –0.876 и –0.836 соответственно. На основе тесной связи многолетних изменений площади морских льдов с ИК получены уравнения линейной и полиномиальной регрессий, описывающие зависимости площади морских льдов от ИК. Сравнение фактических и рассчитанных по ансамблю линейных и полиномиальных решений значений площади морских льдов показало, что многолетними изменениями инсоляционной контрастности определяется 95.1 % многолетней изменчивости

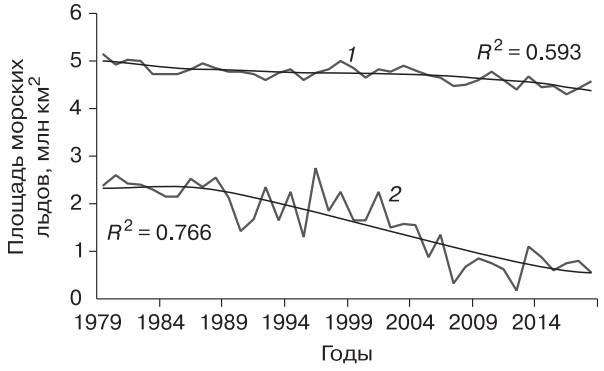

Рис. 1. Изменение максимальных (*1*) и минимальных (*2*) значений площади морских льдов в российской Арктике за время спутниковых наблюдений.

Тренды – полином третьей степени.

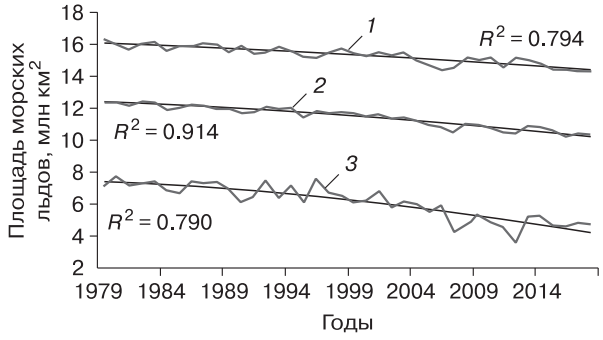

Рис. 2. Изменение площади морских льдов в Северном Ледовитом океане за период 1979–2018 гг. по данным спутниковых наблюдений и их полиномиальные тренды (второй степени):

Площадь: *1* – максимальная, *2* – среднегодовая, *3* – минимальная.

среднегодовой площади морских льдов, 93.5 % максимальной и 89.2 % минимальной площади морских льдов в СЛО. На основе этих связей и прогноза ИК выполнен оценочный прогноз площади морских льдов для СЛО. Согласно прогнозу, в 2050 г. среднегодовая площадь морских льдов в СЛО составит 8.43 млн км^2, максимальная – 12.86 млн км^2, минимальная – 1.87 млн км^2. По сравнению с 2018 г. среднегодовая площадь в 2050 г. сократится на 1.89 млн км^2, максимальная – на 1.44 млн км^2, минимальная – на 2.84 млн км^2. Таким образом, относительно 2018 г. сокращение составит: для среднегодовой площади 18.3 %, для максимальной площади 10.1 %, для минимальной площади морских льдов в СЛО 60.3 %. Полученные значения характеризуют многолетние изменения площади морских льдов в пространственном масштабе СЛО.

При региональных масштабах связи многолетних изменений площади морских льдов с ИК становятся слабее, причем в разных районах отмечаются различные отклики в динамике площади морских льдов на многолетние изменения ИК. Отмеченные для масштабов СЛО связи в отдельных регионах ослабляются местными факторами: движение льда, местные атмосферные процессы (адвекция тепла и холода, облачность), морские течения, географическое положение, геоморфологические условия. Региональные оценки позволяют уточнить роль изменений инсоляции и ИК в динамике площади морских льдов в отдельных морях российской Арктики. В качестве исходных данных по изменению площади морских льдов авторами использовались данные спутниковых измерений, размещенные на электронном ресурсе NOAA [*Fetterer et al., 2017*]. Исходными данными по ИК и инсоляции были рассчитанные ранее базы данных по инсоляции [*Федоров, Костин, 2019*].

Методика расчета инсоляции, инсоляционной контрастности и оценки статистической значимости корреляционных связей

В качестве инсоляционного фактора в работе используются годовая и месячная инсоляция и годовая ИК, рассчитанная для Северного полушария [*Федоров, 2018, 2019б*]. Инсоляция (приходящая на поверхность Земли без учета атмосферы солнечная радиация) была рассчитана авторами ранее с большим пространственным и временным разрешением [*Федоров, 2018, 2019б; Федоров, Фролов, 2019*]. Расчеты инсоляции выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид [*Giorgini et al., 1996;* http://ssd.jpl.nasa.gov] для всей поверхности Земли (без учета атмосферы) в интервале с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. Исходными астрономическими данными для расчетов инсоляции были склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего (координатного времени – coordinated time, CT) и всемирного корректируемого времени (universal time, UT). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 – Geodetic Reference System 1980) с длинами полуосей равными 6 378 137 м (большие) и 6 356 752 м (малая). В общем виде алгоритм расчетов можно представить выражением

$$I_{nm}(\varphi_1,\varphi_2)=\int_{t_1}^{t_2}\left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\sigma(H,\varphi)\left(\int_{-\pi}^{\pi}\Lambda(H,t,\varphi,\alpha)\,d\alpha\right)d\varphi\right)dt,$$

где I – приходящая солнечная радиация за элементарный n-й фрагмент m-го тропического года, Дж; σ – площадной множитель (м^2), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал $\sigma(H,\varphi)d\alpha d\varphi$ – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида; α – часовой угол, рад; φ – географическая широта, рад; H – высота поверхности эллипсоида относительно поверхности Земли, м; $\Lambda(H,t,\varphi,\alpha)$ – инсоляция в заданный момент в конкретном месте поверхности эллипсоида, Вт/м^2; t – время, с. Шаги при интегрировании составляли: по долготе 1°, по широте 1°, по времени 1/360 продолжительности тропического года [*Fedorov, 2013*]. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI – total solar irradiance) принималось равным 1361 Вт/м^2 [*Kopp, Lean, 2011*]. Изменение активности Солнца не учитывалось [*Федоров, 2015, 2019а,б; Федоров, Костин, 2019; Федоров, Фролов, 2019*].

Оценка и значимость линейного коэффициента корреляции при выполнении корреляционного анализа определялись в соответствии с существующими методиками [*Цымбаленко и др., 2007*]. Линейный коэффициент корреляции вычислялся на базе некоторой выборки (из периода инструментальных наблюдений). Следовательно, его оценка представляет случайную величину и необходима проверка ее статистической значимости. Исходные цифровые данные, по которым велись расчеты, представляют выборку из возможно большего числа наблюдений – генеральной совокупности, поэтому авторами рассчитывалась ошибка выборочного коэффициента корреляции, с учетом которой определялась интервальная оценка коэффициента корреляции генеральной совокупности.

Стандартная ошибка коэффициента корреляции рассчитывалась по формуле

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

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

Основу проверки значимости выборочного коэффициента корреляции составляла проверка нулевой гипотезы, т. е. гипотезы о том, что линей-

ная корреляционная зависимость между исследуемыми рядами отсутствует.

Статистическая значимость линейного коэффициента корреляции определялась с использованием критерия Стьюдента, фактическое значение которого находилось по формуле:

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

Выводы о существенности r делались на основе сопоставления $t_{\text{факт}}$ и $t_{\text{кр}}(\delta, n-2)$ – критического (табличного) значения t-распределения (где δ – уровень значимости; $(n-2)$ – число степеней свободы). Коэффициент корреляции признавался статистически значимым, если выполнялось условие $t_{\text{факт}} > t_{\text{кр}}$. В противном случае он признавался статистически незначимым.

Годовой ход площади морских льдов

Годовой ход площади морских льдов имеет четкие максимум (в марте) и минимум (в сентябре) (рис. 3). По фазе максимумы и минимумы площади морских льдов отстают на три месяца от минимума и максимума в годовом ходе инсоляции соответственно. Естественно, что годовой ход инсоляции является основным фактором годового хода площади морских льдов (табл. 1).

Тем не менее отклики на годовой ход инсоляции в отдельных морях различаются. Эти различия оцениваются по коэффициентам корреляции, которые принимают разные значения в морях российской Арктики. Коэффициент корреляции (R) годового хода площади морских льдов и инсоляции для Баренцева моря составляет –0.931, для Карского –0.817, для моря Лаптевых –0.681, для

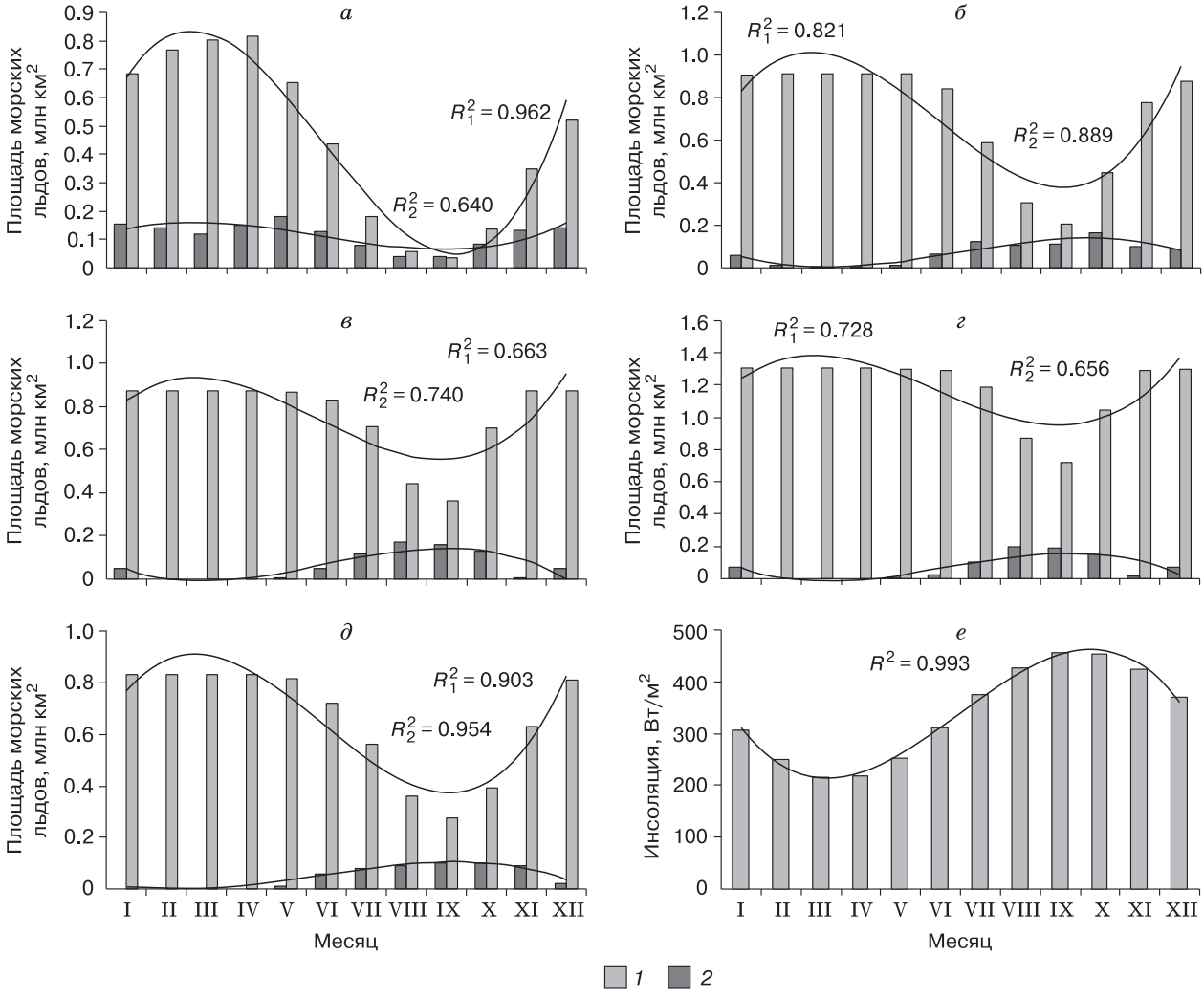

Рис. 3. Годовой ход площади морских льдов (*1*) и амплитуды межгодовой изменчивости (*2*) площади морских льдов в российской Арктике.

Моря: *а* – Баренцево, *б* – Карское, *в* – Лаптевых, *г* – Восточно-Сибирское, *д* – Чукотское; *е* – годовой ход инсоляции (смещенной по фазе в годовом ходе на три месяца назад) в Северном полушарии.

Таблица 1. **Показатели изменений месячных значений площади морских льдов (тыс. км^2) в морях российской Арктики и инсоляции Северного полушария**

Показатель	Баренцево море	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море	Инсоляция, Вт/м^2
Среднее	453.6	716.6	762.5	1184.6	657.2	338.0
Максимум	814.9	914.2	872.4	1303.7	830.3	456.2
Минимум	36.4	207.5	361.6	715.9	276.8	216.8
Δ/среднее	1.716	0.986	0.670	0.496	0.842	0.708
Δ/минимум	21.402	3.405	1.413	0.821	1.999	1.104

Примечание. Δ – разность между максимальным и минимальным значениями.

Восточно-Сибирского –0.712, для Чукотского моря –0.862. Значения *R* статистически значимы с вероятностью 0.99 для всех морей, кроме моря Лаптевых, для которого вероятность равна 0.98. Таким образом, наиболее четкий отклик на годовой ход инсоляции отмечается в окраинных морях российской Арктики (Баренцево и Чукотское). Центральная часть российской Арктики (море Лаптевых) наиболее консервативна по отношению к годовому ходу инсоляции.

Максимальные изменения в годовом ходе характерны для западного сектора российской Арктики. Особенно велик размах колебаний в годовом ходе в Баренцевом море. Это связано с наличием, кроме инсоляции, других мощных региональных факторов: атмосферной циркуляции (Исландско-Карской ложбины низкого давления, по которой в Баренцево море проникают циклоны из района Исландии) и теплого океанического течения Гольфстрим.

Межгодовая изменчивость площади морских льдов

Площадь морского льда меняется не только в течение года (сезонная изменчивость), но и от года к году (межгодовая изменчивость). Максимальные значения амплитуды межгодовой изменчивости приходятся на летний период – на минимум в распространении морских льдов (см. рис. 3, 4, табл. 2). Под амплитудой авторами понимается среднее многолетнее значение модуля разности межгодовых значений площади морских льдов.

В Баренцевом море амплитуда межгодовой изменчивости в сентябре превышает среднее для этого месяца значение площади морских льдов. Годовой ход амплитуды межгодовой изменчивости площади морских льдов тесно связан, таким образом, с годовым ходом площади морских льдов. Коэффициент корреляции для Баренцева моря составляет 0.812, для Карского 0.868, моря Лаптевых 0.723, Восточно-Сибирского 0.781, Чукотского

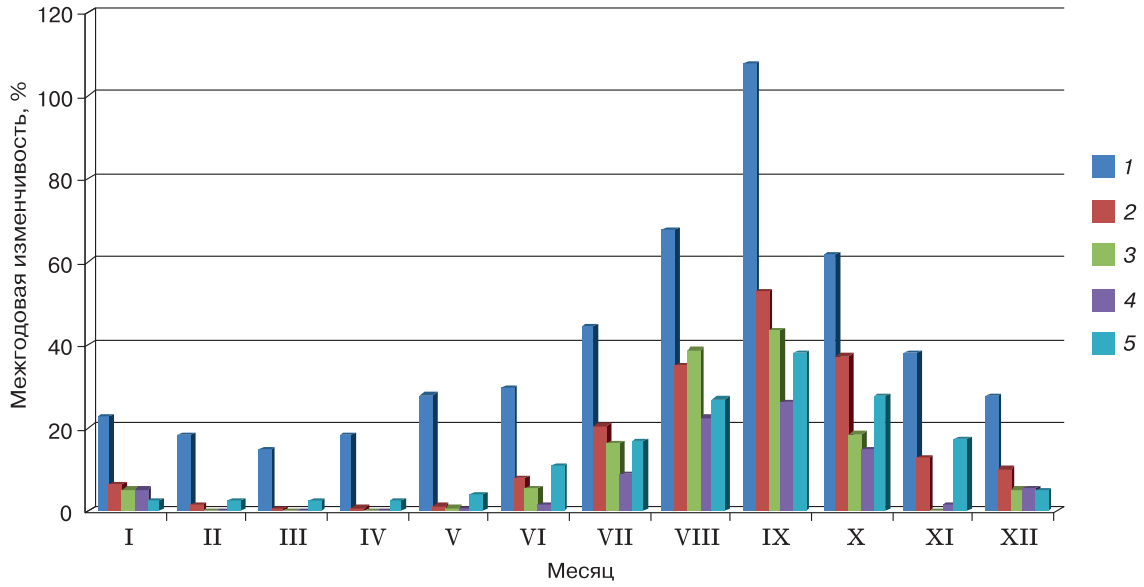

Рис. 4. Межгодовая изменчивость в процентах от среднемноголетнего месячного значения площади морских льдов.

Моря: *1* – Баренцево, *2* – Карское, *3* – Лаптевых, *4* – Восточно-Сибирское, *5* – Чукотское.

Таблица 2. **Годовой ход амплитуды межгодовой изменчивости в процентах от среднего многолетнего для месяца значения площади морских льдов**

Месяц	Баренцево море	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море
Январь	22.7	6.4	5.1	5.1	2.6
Февраль	18.47	1.6	0.0	0.0	2.6
Март	14.9	0.6	0.0	0.0	2.6
Апрель	18.3	0.8	0.0	0.0	2.6
Май	27.9	1.3	0.7	0.4	3.8
Июнь	29.7	7.7	5.3	1.6	10.8
Июль	44.4	20.5	16.3	8.7	16.6
Август	67.8	35.0	38.7	22.5	26.9
Сентябрь	107.8	53.0	43.5	26.1	38.0
Октябрь	61.8	37.3	18.5	14.9	27.8
Ноябрь	38.1	13.0	0.1	1.4	17.1
Декабрь	27.5	10.1	5.1	5.3	5.1
Среднее	39.9	15.6	11.1	7.2	13.0

Таблица 3. **Показатели изменений амплитуды межгодовой изменчивости среднегодовой площади морских льдов в морях российской Арктики (км^2)**

Показатель	Баренцево море	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море
Среднее	116 412.3	71 274.8	59 504.8	68 381.4	46 130.4
Максимум	182 676.0	166 078.2	171 950.8	194 946.3	102 110.4
Минимум	38 401.6	5640.8	5.3	3.3	6.1
Δ/среднее	1.239	2.251	2.890	2.851	2.213

моря 0.878. Статистическая значимость R с вероятностью 0.99 характерна для всех морей. При этом отмечается тесная связь межгодовой изменчивости для морей российской Арктики между собой. Значения парного коэффициента корреляции находятся в диапазоне от 0.811 до 0.986 (вероятность 0.99). Также годовой ход амплитуды межгодовой изменчивости тесно связан с годовым ходом смещенной (на три месяца в прошлое) инсоляции. Коэффициент корреляции между ними для Баренцева моря составляет –0.876, для Карского –0.977, моря Лаптевых –0.991, Восточно-Сибирского –0.974, Чукотского моря –0.990 (статистическая значимость R с вероятностью 0.99 также отмечается для всех морей).

Таким образом, годовой ход амплитуды межгодовой изменчивости среднемесячных значений площади морских льдов также регулируется годовым ходом инсоляции, как и годовой ход площади морских льдов. Несмотря на известную связь годового хода метеохарактеристик и инсоляции, наблюдаются региональные различия в этой связи. Из табл. 3 следует, что в море Лаптевых с февраля по май межгодовая изменчивость близка к нулю (консервативная реакция). В Восточно-Сибирском море сходная ситуация отмечается с февраля по апрель. Центральная часть российской Арктики наиболее консервативна по отношению к инсоляционному фактору в сезонной и межгодовой изменчивости: многолетние изменения годового хода и межгодовой изменчивости площади морских льдов в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море выражены слабо. А в отмеченные периоды с февраля по май площадь распространения морских льдов в этих морях практически не меняется. Наибольшая (в среднем) межгодовая изменчивость месячных значений площади морских льдов характерна для окраинных морей – Баренцева и Чукотского, а также Карского моря.

Многолетние изменения площади морских льдов

Анализировались многолетние изменения среднегодовых и месячных значений площади морских льдов как в отдельных морях, так и в российской Арктике в целом (рис. 5, 6). Среднегодовое значение находилось как среднее по всем месяцам года.

Корреляция многолетней изменчивости среднегодовой площади морских льдов в российской Арктике с годовой ИК Северного полушария составляет –0.831 (вероятность статистической значимости 0.99). Регрессионной моделью на основе ИК (полином второй степени) объясняется 69.8 % многолетних изменений среднегодовой площади морских льдов в российской Арктике.

Сокращение среднегодовой площади морских льдов отмечается для всех морей российской Арктики, несмотря на сокращение приходящей радиации в области стока тепла [*Федоров, 2018*]. Сокра-

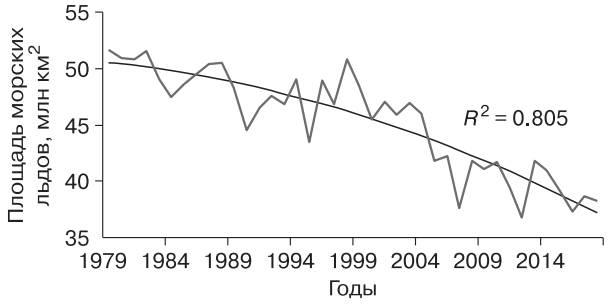

Рис. 5. Изменение среднегодовой площади морских льдов в российской Арктике.

Аппроксимация – полином второй степени.

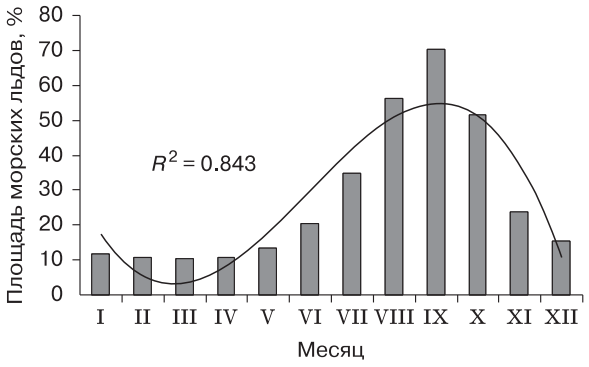

Рис. 7. Годовой ход сокращения среднегодовой площади морских льдов в российской Арктике за период спутниковых наблюдений в процентах от среднего для первой пятилетки (1979–1983).

Аппроксимация – полином третьей степени.

щение связано с тенденцией увеличения ИК и усилением меридионального переноса тепла. Увеличение ИК, как показано ранее, связано с уменьшением наклона оси вращения Земли в современную эпоху. Несомненный научный и практический интерес представляет оценка регионального влияния этого фактора в морях российской Арктики. Значения R в рядах многолетних изменений среднегодовой площади морских льдов и ИК составляют для Баренцева моря –0.782, для Карского –0.721, моря Лаптевых –0.625, Восточно-Сибирского –0.661, Чукотского моря –0.819. Все значения R статистически значимы с вероятностью 0.99.

Сокращение среднегодовых значений площади морских льдов в регионах оценивалось разностью средних за первые пять лет (1979–1983) S_0 и последние пять лет (2014–2018) S_T среднегодовых значений площади морских льдов в массиве данных спутниковых наблюдений. Для Баренцева моря сокращение составляет 384.1 тыс. км^2, для Карского 178.4, для моря Лаптевых 101.4, для Восточно-Сибирского 173.8, для Чукотского моря 150.2 тыс. км^2. Относительное сокращение площади морских льдов рассчитывалось в процентах относительно среднего для первой пятилетки (1979–1983) S_0.

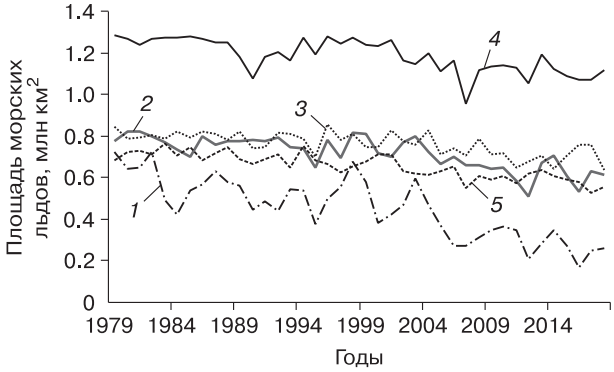

Рис. 6. Изменение среднегодовой площади морских льдов в морях российской Арктики по данным спутниковых наблюдений.

Моря: *1* – Баренцево, *2* – Карское, *3* – Лаптевых, *4* – Восточно-Сибирское, *5* – Чукотское.

Сокращение среднегодовой площади морских льдов в российской Арктике за период спутниковых наблюдений составило 27.4 %. Распределение сокращения площади морских льдов в российской Арктике по месяцам тесно связано с инсоляцией. Коэффициент корреляции годового хода сокращения среднегодовой площади морских льдов и годового хода смещенной (по фазе в годовом ходе на три месяца в прошлое) инсоляции составляет 0.836 (вероятность 0.99) (рис. 7, табл. 4).

Таблица 4. **Сокращение среднегодовой площади морских льдов в российской Арктике по месяцам года**

Месяц	Δ	Δ/S_0	R^2	Смещенная инсоляция, Вт/м^2
Январь	575.6	11.78966	0.606	305.7
Февраль	531.5	10.76759	0.493	249.6
Март	509.7	10.26879	0.454	216.8
Апрель	528.4	10.59843	0.396	217.6
Май	650.8	13.32560	0.432	252.2
Июнь	932.3	20.36982	0.602	310.1
Июль	1355.6	34.89303	0.612	374.3
Август	1582.2	56.27730	0.636	427.4
Сентябрь	1704.7	70.41270	0.654	456.2
Октябрь	1770.1	51.42638	0.657	454.5
Ноябрь	1017.9	23.63600	0.684	422.9
Декабрь	725.1	15.46563	0.722	369.0

Примечание. Δ – разность средних за первые пять лет (1979–1983) S_0 и последние пять лет (2014–2018) S_T среднегодовых значений площади морских льдов в массиве данных спутниковых наблюдений; R^2 – коэффициент детерминации.

Коэффициент корреляции смещенной инсоляции с годовым ходом Δ (см. табл. 4) составляет 0.888, с годовым ходом Δ/S_0 равен 0.836, с годовым ходом коэффициента детерминации (R^2) – 0.869 (вероятность 0.99 для всех значений R). Коэффициент детерминации показывает долю многолетних изменений месячной площади морских льдов в российской Арктике, определяемых многолетними изменениями годовой ИК для Северного полушария (см. рис. 4). Среднегодовое значение R^2 составляет 0.579. Таким образом, многолетняя изменчивость месячной площади морских льдов в российской Арктике на 57.9 % определяется многолетней изменчивостью годовой ИК в Северном полушарии. Однако годовой ход показывает неравномерное по месяцам распределение коэффициента детерминации (рис. 8, табл. 5).

Проанализирована многолетняя изменчивость месячных значений площади морских льдов в морях российской Арктики (табл. 6).

Годовой ход среднемесячного сокращения площади морских льдов тесно связан с годовым ходом инсоляции, смещенным по фазе на три месяца в прошлое (последняя строка в табл. 6). Коэффициент корреляции годового хода сокращения среднемесячной площади морских льдов и годового хода инсоляции для Баренцева моря характеризуется отрицательным значением. Это

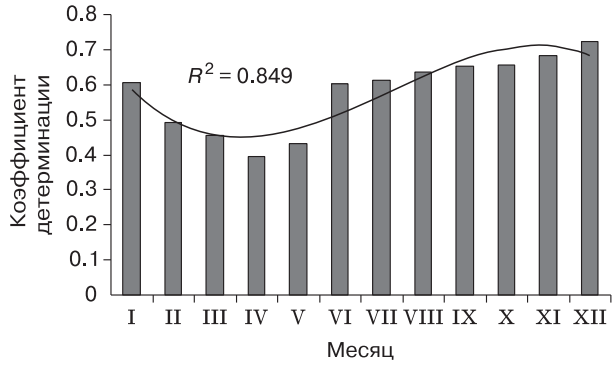

Рис. 8. Годовой ход коэффициента детерминации (полином второй степени) многолетних изменений среднегодовой площади морских льдов в российской Арктике и годовой инсоляционной контрастности (полином третьей степени).

Этот ход характеризуется тесной корреляцией с годовым ходом, смещенным по фазе на три месяца, солнечной радиации (R^2 = 0.869) и годовым ходом среднегодовых значений площади морских льдов (R^2 = 0.994).

Таблица 5. **Сокращение среднегодовой площади морских льдов в морях российской Арктики в процентах от средней площади морских льдов в первую пятилетку (1979–1983 гг.)**

Показатель	Баренцево море	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море
S_0	7752.5	9556.9	9618.5	15 180.4	8673.8
S_T	3113.5	7416. 4	8402.0	13 094. 7	6871.8
Δ, тыс. км^2	4639.0	2140. 5	1216.5	2085.7	1802.0
Δ/S_0, %	59.8	22.4	12.7	13.7	20.8

Таблица 6. **Сокращение среднемесячной площади морских льдов в морях российской Арктики за время спутниковых наблюдений по месяцам года**

Месяц	Баренцево море		Карское море		Море Лаптевых		Восточно-Сибирское море		Чукотское море	
	тыс. км^2	%	тыс. км^2	%	тыс. км^2	%	тыс. км^2	%	тыс. км^2	%
Январь	534.0	55.7	40.3	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.2
Февраль	512.8	50.7	18.1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.1
Март	494.9	47.6	14.8	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Апрель	521.3	49.1	5.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.2
Май	574.1	59.5	16.5	1.8	1.4	0.2	3.5	0.3	55.4	6.7
Июнь	567.6	76.0	168.4	18.5	51.5	6.0	18.2	1.4	126.6	16.6
Июль	299.9	84.3	466.9	56.8	195.7	24.7	209.5	16.4	183.6	28.9
Август	81.3	73.7	385.1	77.8	290.9	52.0	532.1	46.2	292.8	59.1
Сентябрь	37.9	64.5	261.6	78.9	345.1	69.0	681.8	64.0	378.2	81.3
Октябрь	134.7	70.4	397.8	64.5	329.4	40.8	558.9	44.3	349.3	61.8
Ноябрь	347.3	71.0	257.3	29.5	2.5	0.3	79.1	6.1	331.7	43.2
Декабрь	533.2	69.6	108.2	11.8	0.0	0.0	2.8	0.2	80.8	9.7
R	–0.826	0.716	0.833	0.869	0.766	0.741	0.792	0.776	0.930	0.901

Примечание. R – коэффициент корреляции сокращения со смещенным годовым ходом инсоляции (значения R статистически значимы с вероятностью 0.99).

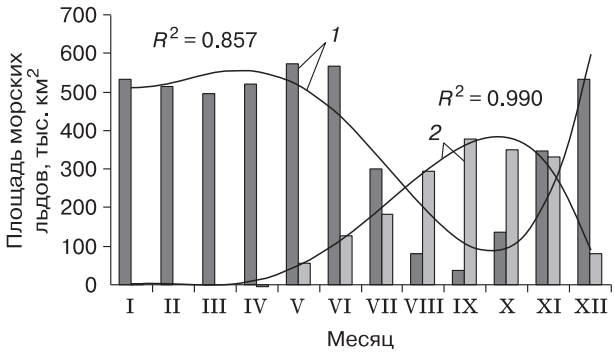

Рис. 9. Годовой ход среднемесячного сокращения площади морских льдов (тыс. км^2) в Баренцевом (*1*) и Чукотском (*2*) морях.

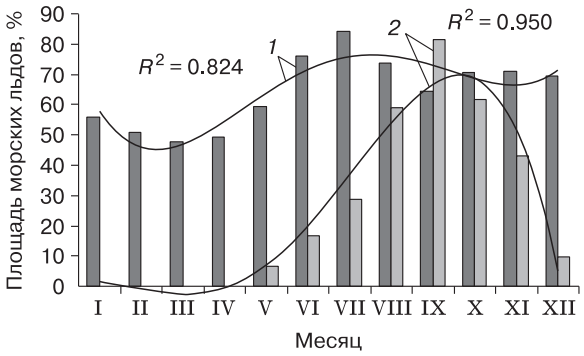

Рис. 10. Годовой ход среднемесячного сокращения площади морских льдов в Баренцевом (*1*) и Чукотском (*2*) морях (в процентах от S_0 – среднего за 1979–1983 гг.).

подтверждает то, что инсоляционный фактор не является основным при сокращении площади морских льдов в данном районе российской Арктики. Здесь годовой ход сокращения в большей степени, вероятно, определяется атмосферной циркуляцией (Исландско-Карская ложбина) и океаническим течением Гольфстрим (рис. 9, 10).

Максимальные многолетние изменения среднемесячной площади морских льдов хронологически фиксируются в том же временном диапазоне, в котором отмечаются максимальная амплитуда межгодовой изменчивости (см. рис. 4) и минимальная среднемесячная площадь морских льдов (рис. 11). Размах изменений рассчитывался как отношение разности максимального и минимального значений к среднему значению среднемесячной площади морских льдов (за период спутниковых наблюдений).

С применением корреляционного анализа исследовались отклики многолетних месячных значений площади морских льдов в разных районах российской Арктики на многолетние изменения годовой ИК в Северном полушарии (см. табл. 1). С увеличением пространственного (отдельные моря) и временного (месяц) разрешения корреляционные связи изменений площади морских льдов с ИК становятся слабее; увеличивается вклад местных факторов: географическое положение, океанические течения, атмосферная циркуляция и др. (табл. 7).

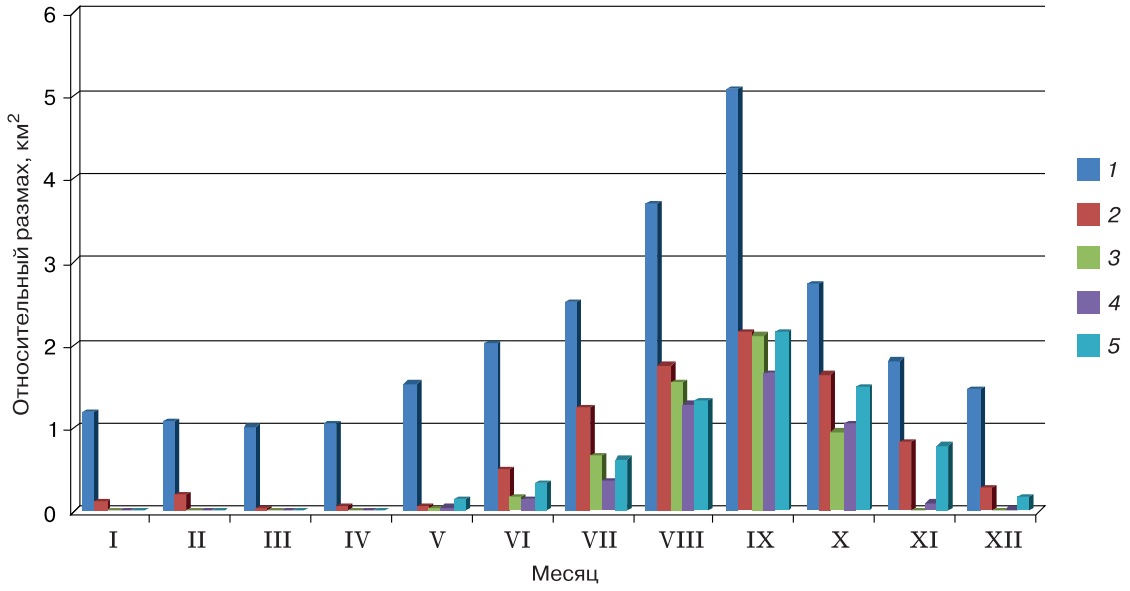

Рис. 11. Годовой ход относительного размаха многолетних изменений месячной площади морских льдов в российской Арктике.

Моря: *1* – Баренцево, *2* – Карское, *3* – Лаптевых, *4* – Восточно-Сибирское, *5* – Чукотское.

Таблица 7. **Корреляционная связь многолетних месячных значений площади морских льдов с ИК**

Месяц	Баренцево море	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море
Январь	–0.765	–0.608	0.158	0.205	–0.355
Февраль	–0.705	–0.307	–0.035	–0.031	–0.299
Март	–0.670	–0.462	0.262	0.141	0.174
Апрель	–0.641	–0.078	–0.099	0.209	–0.326
Май	–0.633	–0.251	–0.165	0.109	–0.642
Июнь	–0.735	–0.525	–0.439	0.023	–0.595
Июль	–0.725	–0.736	–0.542	–0.381	–0.676
Август	–0.590	–0.727	–0.584	–0.583	–0.769
Сентябрь	–0.361	–0.589	–0.622	–0.699	–0.813
Октябрь	–0.581	–0.642	–0.645	–0.714	–0.774
Ноябрь	–0.724	–0.613	–0.380	–0.554	–0.688
Декабрь	–0.831	–0.577	0.081	–0.198	–0.586
Среднее	–0.663	–0.510	–0.251	–0.206	–0.529
R	0.365	–0.783	–0.756	–0.941	–0.804

Примечание. *R* – коэффициент корреляции месячных значений площади морских льдов и годового хода инсоляции (смещенного по фазе на три месяца).

Среднее для месяца значение коэффициента корреляции составляет 0.423 (см. табл. 7). Изменение коэффициента корреляции по месяцам характеризуется тесной и отрицательной корреляционной связью с годовым ходом смещенной инсоляции (последняя строка в табл. 7). Почти для всех морей значения *R* статистически значимы с вероятностью 0.99. Исключение составляет Баренцево море, для которого получена слабая и статистически ненадежная положительная корреляция (значение статистически значимо с вероятностью 0.75). Этим подтверждается значительное влияние не связанных с инсоляцией факторов на многолетнюю изменчивость площади морских льдов в этом районе российской Арктики.

Во всех морях российской Арктики отмечается заметная и тесная отрицательная корреляционная связь многолетних среднегодовых изменений площади морских льдов и многолетних изменений годовой ИК в Северном полушарии [*Цымбаленко и др., 2007*]. В среднем для морей российской Арктики *R* составляет –0.719 (вероятность 0.99). Наиболее интенсивные отклики на многолетние изменения ИК (отражающей изменения в меридиональном переносе тепла из низких широт в высокие) отмечаются для Чукотского (–0.819) и Баренцева (–0.782) морей. На основе найденных связей по линейным и полиномиальным (полином второй степени) уравнениям регрессии рассчитывались среднегодовые значения площади морских льдов в морях российской Арктики. Оценочный прогноз (до 2050 г.) выполнялся по ансамблю значений площади морских льдов, рассчитанных по линейному и полиномиальному уравнениям регрессии (рис. 12).

Дисперсионный анализ показывает, что многолетними изменениями ИК в Баренцевом море определяется 69.1 % многолетних изменений среднегодовых значений площади морских льдов, в Чукотском море – 68.4 %, в остальных морях эти значения меньше. В Карском море многолетними изменениями ИК (годовых для Северного полушария) определяется 52.3 % среднегодовых изменений площади морских льдов, в море Лаптевых 39.1 %, Восточно-Сибирском море 44.5 %. Выполненный оценочный прогноз показывает, что Баренцево море в конце 30-х гг. нашего столетия может быть свободным ото льда в течение всего года (см. рис. 12). Средний по всем морям российской Арктики коэффициент детерминации составляет 0.547.

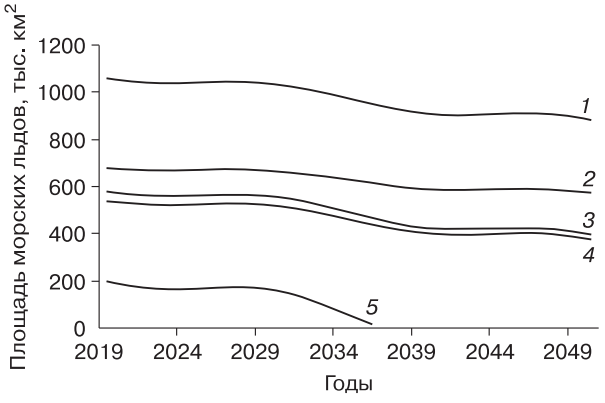

Рис. 12. Оценочный прогноз изменения среднегодовых значений площади морских льдов в морях российской Арктики.

Моря: *1* – Баренцево, *2* – Карское, *3* – Лаптевых, *4* – Восточно-Сибирское, *5* – Чукотское.

Таблица 8. **Значения коэффициента детерминации (R^2) в уравнении регрессии месячных значений площади морских льдов с ИК**

Месяц	Баренцево море	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море
Январь	0.588	0.497	0.008	0.060	0.341
Февраль	0.505	0.094	0.028	0.008	0.335
Март	0.451	0.279	0.074	0.024	0.034
Апрель	0.412	0.011	0.022	0.045	0.366
Май	0.401	0.064	0.028	0.023	0.646
Июнь	0.541	0.281	0.201	0.025	0.438
Июль	0.530	0.542	0.294	0.181	0.539
Август	0.357	0.530	0.341	0.341	0.606
Сентябрь	0.131	0.348	0.387	0.488	0.661
Октябрь	0.344	0.429	0.452	0.533	0.635
Ноябрь	0.548	0.402	0.356	0.391	0.638
Декабрь	0.703	0.360	0.024	0.040	0.470
Среднее	0.459	0.320	0.185	0.180	0.476
R	–0.290	0.719	0.863	0.882	0.739

Рассчитывались многолетние изменения месячной площади морских льдов для морей российской Арктики. На основе регрессионного анализа многолетних изменений месячных значений площади морских льдов и многолетних изменений годовой ИК (для Северного полушария) получены значения коэффициента детерминации. Коэффициент детерминации показывает долю многолетних изменений месячной площади морских льдов, определяемой в регрессионной модели многолетними изменениями ИК (табл. 8).

Таким образом, получена оценка роли инсоляционного фактора в масштабе отдельных морей российской Арктики для многолетних изменений месячных значений площади морских льдов. Все значения *R* (за исключением Баренцева моря) статистически значимы с вероятностью 0.99. Значение *R* для Баренцева моря статистически не значимо.

В Баренцевом море в среднем в многолетних месячных изменениях 45.9 % определяется многолетними изменениями ИК. Максимальное значение отмечается в декабре – 70.3 %. В Чукотском море в среднем в многолетних месячных изменениях 47.6 % определяется многолетними изменениями ИК. Максимальные значения отмечаются для многолетних изменений площади морских льдов в мае (64.6 %) и в период с августа по ноябрь (т. е. охватывают период максимальной изменчивости, см. рис. 11). Моря центральной части российской Арктики более консервативны относительно фактора ИК. В среднем в Карском море 32 % многолетних изменений месячных значений площади морских льдов определяются многолетними изменениями ИК, в море Лаптевых только 18.5 %, в Восточно-Сибирском – 18 %. Средний по всем морям российской Арктики коэффициент детерминации составляет 0.324.

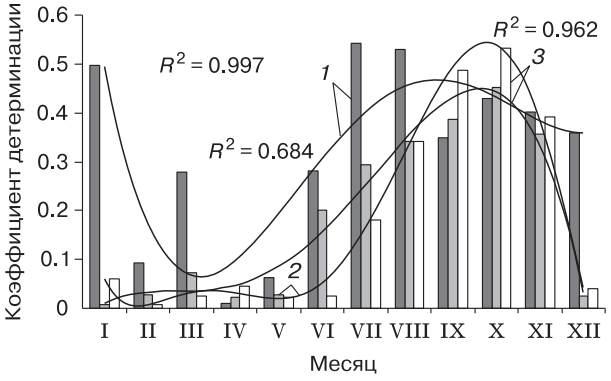

Рис. 13. Годовой ход коэффициента детерминации в Карском море (*1*), море Лаптевых (*2*) и Восточно-Сибирском море (*3*).

Аппроксимация – полином четвертой степени.

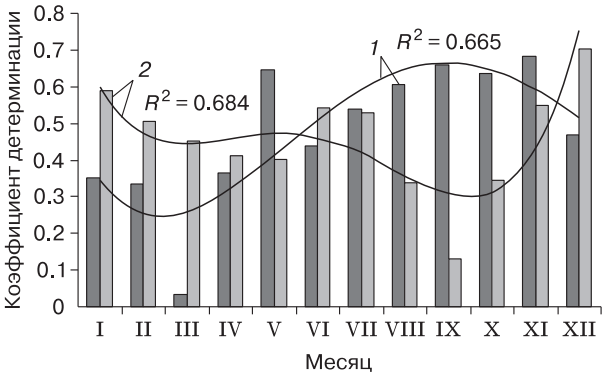

Рис. 14. Годовой ход коэффициента детерминации в Чукотском (*1*) и Баренцевом (*2*) морях.

Аппроксимация – полином четвертой степени.

Наиболее синхронно с годовым ходом инсоляции изменяется площадь морских льдов в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море. Слабее согласованность в годовом ходе в Карском и Чукотском морях (см. табл. 8). При этом в Баренцевом море отмечается отличный от остальных морей российской Арктики характер распределения (рис. 13, 14).

Коэффициент корреляции для Чукотского моря в годовом распределении коэффициента детерминации (см. табл. 8) и годового хода размаха изменений равен 0.650 (вероятность 0.95), для Баренцева моря –0.692 (вероятность 0.98). То есть в Баренцевом море ИК объясняет часть многолетних изменений, но не из области их максимального размаха. Вероятно, здесь основная роль принадлежит иным факторам (у которых ход изменений согласован с ходом коэффициента детерминации). Этими факторами являются атмосферная циркуляция (траектория внетропических циклонов совпадает с Исландско-Карской ложбиной низкого давления) и теплое течение Гольфстрим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружена статистическая связь многолетних изменений площади морского льда с изменениями ИК. В многолетних изменениях площади морских льдов связь с ИК уменьшается с увеличением пространственного масштаба исследований. Так, для всего СЛО коэффициент корреляции между многолетними изменениями ИК и среднегодовыми значениями площади морских льдов составляет –0.920. В регрессионной модели 95.1 % многолетних изменений среднегодовых значений площади морских льдов определяется многолетними изменениями ИК. Для масштаба российской Арктики коэффициент корреляции уменьшается до –0.831, а в регрессионной модели 69.8 % многолетних изменений среднегодовых значений объясняется изменениями ИК. В масштабе морей российской Арктики в среднем коэффициент корреляции составляет –0.719, а многолетними изменениями ИК в среднем объясняется 54.7 % многолетних изменений среднегодовой площади морских льдов.

Многолетними изменениями ИК объясняется 57.9 % изменений месячных значений площади морских льдов в российской Арктике и в среднем 32.4 % месячных изменений площади морских льдов в морях российской Арктики.

В годовом ходе площади морских льдов и инсоляции отмечается более тесная и стабильная корреляционная связь между ними. При этом с увеличением пространственного масштаба эта корреляционная связь ослабевает, но остается весьма тесной. Так, коэффициент корреляции годового хода инсоляции (смещенной на три месяца) и годового хода площади морских льдов в СЛО составляет –0.906, в российской Арктике равен –0.892, в морях российской Арктики в среднем –0.801. Кроме того, с годовым ходом инсоляции тесно связаны годовой ход амплитуды межгодовой изменчивости площади морских льдов, распределение коэффициента детерминации в регрессионных моделях с ИК и годовой ход сокращения площади морских льдов. Это является отражением важной роли годового колебания инсоляции в криосфере и климатической системе Земли.

Наиболее консервативными по отношению к инсоляционному фактору являются моря центральной части российской Арктики (Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское моря). Наиболее активный отклик в динамике площади морских льдов отмечается для окраинных морей российской Арктики. При этом характер отклика в Баренцевом и Чукотском морях различный. Это связано со значительным участием в изменении площади морских льдов (в годовом ходе и многолетних изменениях) циркуляционного фактора и влиянием на Баренцево море океанического течения Гольфстрим. Влияние теплых водных масс Берингова моря на изменение площади морских льдов в Чукотском море менее заметно, что, вероятно, определяется узостью Берингова пролива.

Опыт подобных оценок роли инсоляционного фактора в изменении площади морских льдов может иметь теоретическое значение при построении региональных моделей климата, а также практическое значение при разработке стратегических планов нового этапа освоения российской Арктики.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы "Геоэкологический анализ и прогноз динамики криолитозоны российской Арктики" (АААА-А16-116032810055-0) и "Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов" (АААА-А16-116032810093-2).

Литература

Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И. и др. Эволюция площади морского ледового покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исслед. Земли из космоса, 2015, № 2, с. 5–19, DOI: 10.7868/S0205961415020025.

Бурке А. Морские льды. Л.; М., Главсевморпуть, 1940, 96 с.

Захаров В.Ф. Льды Арктики и современные природные процессы. Л., Гидрометеоиздат, 1981, 136 с.

Захаров В.Ф. Морские льды и климат / В.Ф. Захаров, В.Н. Малинин. СПб., Гидрометеоиздат, 2000, 92 с.

Зубов Н.Н. Морские воды и льды. М., Гидрометеоиздат, 1938, 453 с.

Корякин В.С. Ледники Арктики. М., Наука, 1988, 160 с.

Ледяные образования морей западной Арктики / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб., ААНИИ, 2006, 272 с.

Морской лед / Под ред. И.Е. Фролова, В.П. Гаврило. СПб., Гидрометеоиздат, 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. Вариации инсоляции Земли и особенности их учета в физико-математических моделях климата // Успехи физ. наук, 2019а, т. 189, № 1, с. 33–46, DOI: 10.3367/UFNr.2017.12.038267.

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

Федоров В.М., Гребенников П.Б. Инсоляционная контрастность Земли и изменение площади морских льдов в Северном полушарии // Арктика: экология и экономика, 2018, № 4 (32), с. 86–94, DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-86-94.

Федоров В.М., Костин А.А. Вычисление инсоляции Земли для периода от 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э. // Процессы в геосредах, 2019, № 2, с. 254–262.

Федоров В.М., Фролов Д.М. Пространственная и временная изменчивость приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации // Космические исслед., 2019, т. 57, № 3, с. 177–184, DOI: 10.1134/S002342061903004X.

Цымбаленко Т.Т., Байдаков А.Н., Цымбаленко О.С., Гладилин А.В. Методы математической статистики в обработке экономической информации. М., Финансы и статистика, 2007, 200 с.

Шалина Е.В., Бобылев Л.П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса, 2017, т. 14, № 6, с. 28–41, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-28-41.

Fedorov V.M. Interannual variations in the duration of the tropical year // Doklady Earth Sciences, 2013, vol. 451, pt 1, p. 750–753, DOI: 10.1134/S1028334X13070015.

Fetterer F., Knowles K., Meier W. et al. Sea Ice Index, Version 3. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2017, DOI: 10.7265/N5K072F8.

Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B. et al. JPL's on-line solar system data service // Bull. Amer. Astronom. Soc., 1996, vol. 28 (3), p. 1158.

Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // Geophys. Res. Lett., 2011, vol. 37, p. L01706, DOI: 10.1029/2010GL045777.

URL: http://ssd.jpl.nasa.gov – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). – [Электрон. ресурс Нац. управления по аэронавтике и исслед. космического пространства (США)] (дата обращения: 25.08.2019).

References

Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I. et al. Arctic sea ice cover in connection with climate change. Issledovanie Zemli iz Kosmosa, 2015, No. 2, p. 5–19, DOI: 10.7868/S0205961415020025.

Burke A. Morskie l'dy [Sea Ice]. Leningrad; Moscow, Glavsevmorput', 1940, 96 p. (in Russian).

Zakharov V.F. L'dy Arktiki i sovremennye prirodnye protsessy [Ice of the Arctic and Current Natural Processes]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1981, 136 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 [Seawater and Ice]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1938, 454 p. (in Russian).

Koryakin V.S. Ledniki Arktiki [Arctic Glaciers]. Moscow, Nauka, 1988, 160 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).

Frolov I.E., Gavrilo 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. Earth's insolation variation and its incorporation into physical and mathematical climate models. Physics-Uspekhi, 2019a, vol. 62, No. 1, p. 32–45, DOI: 10.3367/UFNe.2017.12.038267.

Fedorov V.M. The problem of meridional heat transport into the astronomical climate theory. Geofizicheskie Protsessy i Biosfera [Geophysical Processes and Biosphere], 2019b, vol. 18, No. 3, p. 117–128, DOI: 10.21455/gpb2019.3-8.

Fedorov V.M., Grebennikov P.B. Insolation contrast of the Earth and changes in the sea ice extent in the Northern Hemisphere. Arktika: Ekologiya i Ekonomika [The Arctic: Ecology and Economy], 2018, No. 4 (32), p. 86–94, DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-86-94.

Fedorov V.M., Kostin A.A. The Earth's insolation calculations for the period from 3000 BC to 2999 AD. Protsessy v geosredakh [Processes in Geosciences], 2019, No. 2, p. 254–262 (in Russian).

Fedorov V.M., Frolov D.M. Spatial and temporal variability of solar radiation arriving at the top the atmosphere. In: Cosmic Research (English translation of Kosimicheskie Issledovaniya), Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), 2019, vol. 57, No. 3, p. 156–162, DOI: 10.1134/S0010952519030043.

Tsymbalenko T.T., Baydakov A.N., Tsimbalenko O.S., Gladilin A.V. Metody matematicheskoy statistiki v obrabotke ekonomicheskoy informatsii [Mathematical Statistics Methods in the Processing of Economic Information]. Moscow, Finansy i Statistika, 2007, 200 p. (in Russian).

Shalina E.V., Bobylev L.P. Sea ice transformations in the Arctic from satellite observations. In: Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa, 2017, vol. 14. No. 6, p. 28–41, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-28-41.

Fedorov V.M. Interannual variations in the duration of the tropical year. Doklady Earth Sciences, 2013, vol. 451, pt 1, p. 750–753, DOI: 10.1134/S1028334X13070015.

Fetterer F., Knowles K., Meier W. et al. Updated daily sea ice index, version 3. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2017, DOI: 10.7265/N5K072F8.

Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B. et al. JPL's online solar system data service. Bulletin of the American Astronomical Society, 1996, vol. 28 (3), p. 1158.

Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. Geophysical Research Letters, 2011, vol. 37, p. L01706, DOI: 10.1029/2010GL045777.

URL: http://ssd.jpl.nasa.gov/ – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics) (last visited: 25.08.2019).

Поступила в редакцию 21 октября 2019 г.,
после доработки – 14 февраля 2020 г.,
принята к публикации 27 февраля 2020 г.