

**МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ  
METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY**

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-64-75>  
УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Оценка влияния метеорологических параметров  
на изменчивость площади и толщины морского льда  
в Карском море***У.В. Прохорова*

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

*yliwa@rambler.ru***Резюме**

В работе приведена количественная оценка влияния метеорологических параметров, таких как температура воздуха, влагосодержание атмосферы, нисходящее длинноволновое излучение, на толщину и площадь льда в Карском море. На основе установленных связей предложена регрессионная модель прогноза площади льда Карского моря с заблаговременностью 3 месяца. Рассмотрено удаленное влияние на площадь льда в Карском море аномалий от средней температуры поверхности океана в тропиках Северной Атлантики. Установленная значимая корреляция может послужить основанием для прогноза площади льда Карского моря с заблаговременностью до трех лет.

**Ключевые слова:** изменение климата, Карское море, морской лед, прогноз.

**Для цитирования:** Прохорова У.В. Оценка влияния метеорологических параметров на изменчивость площади и толщины морского льда в Карском море // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 68. № 1. С. 64–75. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-64-75>.

Поступила 08.11.2021

После переработки 24.12.2021

Принята 29.12.2021

**Assessing the influence of meteorological parameters on sea ice area  
and thickness variability in the Kara Sea***Uliana V. Prokhorova*

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

*yliwa@rambler.ru***Summary**

The reduction of the sea ice area in the Arctic is one of the most notable consequences of climate change, with the Kara Sea contributing about 5 % to the overall reduction. The aim of this study is to assess the impact of changes in climatic conditions on the reduction of the area and thickness of the sea ice in the Kara Sea and the possibility of using the established dependencies for climate forecasting. The article provides quantitative estimates of the

relationship between interannual changes in the sea ice thickness and sea ice extent in the Kara Sea and climate changes in the region and the remote influence of the sea surface temperature in the tropical North Atlantic for 1979–2019. The paper uses observation data obtained at meteorological stations, ERA5 reanalysis and data on the sea ice extent from the Arctic and Antarctic Research Institute website. In summer, the melting of sea ice is largely due to changes in the surface air temperature (correlation coefficient from  $-0.57$  to  $-0.91$ ). In winter, the ice thickness depends on the sum of frost degree-days ( $r = -0.80$ ). The temperature regime, in turn, is determined by the radiation balance, namely, by the variability in the long-wave flow due to the increase in the water vapor content. On the basis of the relationships established, a linear regression model is proposed for forecasting the sea ice area with a lead time of about three months. The model is effective and statistically significant. The paper considers the remote influence of the sea surface temperature anomalies in the North Atlantic tropics on the ice coverage of the Kara Sea. The response of the sea ice extent to the sea surface temperature in the low latitudes is 30–34 months late. The significant correlation between the anomalies can serve as a basis for predicting the sea ice area in the Kara Sea with a lead time of up to three years.

**Keywords:** climate change, forecast, Kara Sea, sea ice.

**For Citation:** Prokhorova U.V. Assessing the influence of meteorological parameters on sea ice area and thickness variability in the Kara Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (1): 64–75. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-64-75>.

Received 08.11.2021

Revised 24.12.2021

Accepted 29.12.2021

## ВВЕДЕНИЕ

Сокращение площади морского льда в Арктике является одним из наиболее заметных следствий глобального потепления. За период с 1979 по 2019 г. среднегодовая площадь морского льда в Арктике уменьшилась более чем на 2 млн км<sup>2</sup>. Сокращение площади, занятой морским льдом в сентябре, составило с 1980 по 2019 г. 3,16 млн км<sup>2</sup> (49,9 %), а в марте 1,51 млн км<sup>2</sup> (10,6 %) [1]. Влияние потепления на наблюдаемые изменения в ледовых условиях очевидно из значений коэффициентов корреляции между изменениями летней приповерхностной температуры воздуха в морской Арктике и площадью морского льда в сентябре, которая за 1980–2016 гг. составила  $-0,93$  [2]. Влияние потепления климата также проявляется в изменении толщины и возраста морского льда. Доля многолетнего морского льда (в возрасте от 5 лет) уменьшилась с 30 % до 2 % в период с 1979 по 2018 г., а количество однолетнего морского льда увеличилось с 40 % до 60–70 % [3]. Толщина льда в Центральной Арктике, по данным спутниковой альтиметрии, уменьшилась на 65 %: с 3,59 м до 1,25 м за период с 1975 по 2012 г. [4].

Вклад сибирских арктических морей в общее сокращение площади морского льда составляет около 35 %, а на долю Карского моря приходится 5 % [5]. В межгодовых изменениях площади льда в сибирских морях преобладают долгопериодные колебания, наиболее значительные среди арктических морей [6].

На межгодовую изменчивость площади морского льда в Карском море в холодную половину года влияет приток теплой и соленой воды из Атлантики [7, 8]. В работах [9, 10] была показана определяющая роль изменений притока воды из Атлантики на площадь льда в Баренцевом море в холодную часть года. Истоки изменений найдены в тропической области Северной Атлантики, где повышение температуры поверхности воды через 2–3 года проявляется в температуре атлантической воды на разрезе по Кольскому меридиану и сокращении зимней площади льда в Северном Ледовитом океане [2].

Цель данного исследования — оценка влияния изменений климатических условий на сокращение площади и уменьшение толщины морских льдов в Карском море и возможности использования установленных зависимостей для климатического прогнозирования.

### ДАнные И МЕТОды

В работе использованы данные реанализа ERA5 [11] за 1979–2019 гг., включающие температуру воздуха на уровне 2 м и нисходящий поток длинноволновой радиации. Данные о площади морского льда в Карском море за период с 1979 по 2019 г. получены на сайте ФГБУ «ААНИИ» [12]. Данные по толщинам припая за период 1979–2016 гг. были собраны в отделе ледового режима и прогнозов ФГБУ «ААНИИ» из наблюдений на арктических станциях, расположенных на побережье Карского моря (м. Стерлегова, м. Голомянный, о. Белый, о. Визе, Марресале, Диксон). Ряды данных были приведены к стационарным: из данных был удален тренд и сезонные колебания.

Для валидации данных ERA5 по приповерхностной температуре воздуха был использован архив мирового центра данных (г. Обнинск). Суммы градусо-дней мороза рассчитаны по суточным данным температуры воздуха на станциях: м. Стерлегова, м. Голомянный, о. Белый (ГМО им. М.В. Попова), о. Визе, Марресале, Диксон, Малые Кармакулы.

Физическая зависимость толщины нарастания морского льда от температуры воздуха определена в работах [13, 14]. В случае с толщинами льда до 1 м зависимость нарастания льда от температуры определяется уравнением:

$$H^2(t) = H_0^2 + 2 \int_0^t \left( \lambda \frac{\Theta - T_0}{L'\rho} - \frac{F_w H}{L'\rho} \right) dt, \quad (1)$$

где  $H$  — толщина льда, мм;  $\lambda$  — теплопроводность льда, Вт/(м·К);  $\Theta$  — температура замерзания воды, °С;  $T_0$  — температура поверхности льда, °С;  $F_w$  — поток тепла от воды, Вт/м<sup>2</sup>;  $L'\rho$  — удельная теплота плавления льда, кДж/кг.

При неизменных  $\lambda$ ,  $L'$ ,  $\rho$  интеграл от разности температур  $(\Theta - T_0)$  называют «суммой градусо-дней мороза». С ростом толщины льда второе слагаемое подынтегрального выражения уменьшается, это свидетельствует о том, что рост тонкого льда происходит быстрее, чем толстого.

При упрощении выражения (1) получено [8, 15] выражение, показывающее зависимость толщины льда от приповерхностной температуры воздуха:

$$H_t = 3,5 \sqrt{|R|},$$

где  $H_t$  — толщина льда, мм;  $R$  — сумма градусо-дней мороза, °С.

Прогноз изменения площади морского льда строился на основе зависимости от метеопараметров на акватории Карского моря и с учетом влияния аномалий температуры воды в тропической области Северной Атлантики.

Оценка зависимости между аномалиями от средней температуры поверхности океана в низких широтах Северной Атлантики и площадью морского льда в Карском море включала в себя как оценку корреляционной зависимости между параметрами, так и поиск фазовых сдвигов одного параметра относительно другого. Расчеты проводились по среднемесячным данным температуры поверхности океана, осредненным по области 5–25° с. ш., 60–10° з. д.

В работе использован метод взаимно-корреляционного анализа исходных рядов для оценки максимального коэффициента корреляции между ними и соответствующего сдвига (запаздывания). Данный анализ позволяет определить максимальную корреляционную связь процессов при условии сдвига временных серий друг относительно друга на некоторый временной промежуток — лаг. Взаимная корреляционная функция определяется для двух стационарных временных рядов как коэффициент корреляции между ними в зависимости от лага.

Регрессионные оценки получены методом наименьших квадратов.

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛОЩАДИ И ТОЛЩИНЫ МОРСКОГО ЛЬДА В КАРСКОМ МОРЕ

В межгодовой изменчивости приповерхностной температуры воздуха, содержания водяного пара и нисходящей длинноволновой радиации по усредненным данным для Карского моря за период с 1979 по 2019 г. присутствуют межгодовые колебания и положительный линейный тренд (рис. 1а). Однако в темпах потепления обнаружена существенная разница, и потому анализ линейного тренда проводился для двух периодов: с 1979 по 2000 г. и с 2000 по 2019 г.

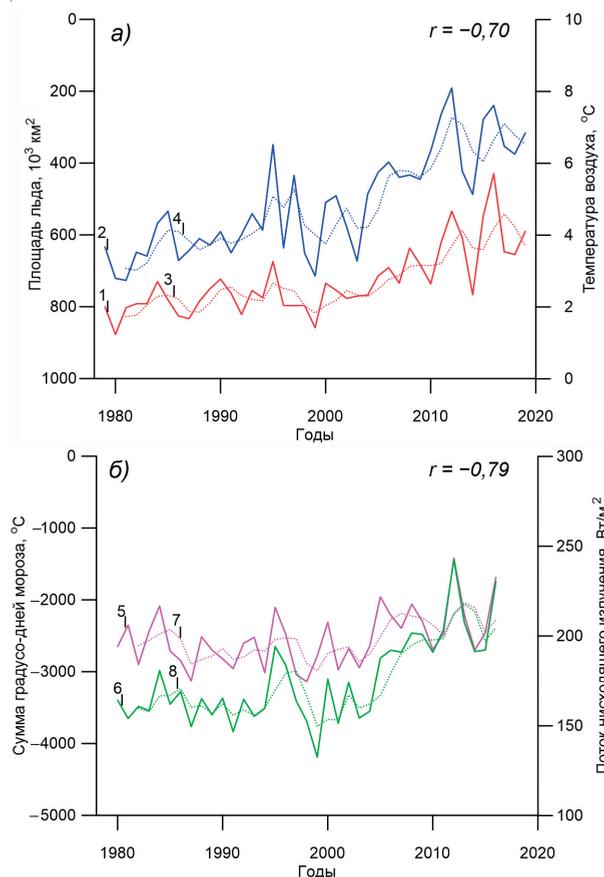


Рис. 1. Межгодовая изменчивость а) приповерхностной температуры воздуха (1) и площади морского льда (2) в Карском море за период июль–август с 1979 по 2019 г. по данным реанализа ERA5; сглаживание по 3 года (3–4); б) суммы градусо-дней мороза (5) и потока нисходящей длинноволновой радиации (6) за ноябрь–апрель в Карском море за 1980–2016 гг. по данным наблюдений и реанализа ERA5; сглаживание по 3 года (7–8);  $r$  — коэффициент корреляции после удаления тренда

Fig. 1. Interannual variability of а) surface air temperature (1) and sea ice area (2) in the Kara Sea for the period July–August from 1979 to 2019 according to the ERA5 reanalysis data; smoothing for 3 years (3–4); б) sum of frost degree day (5) and descending long-wave radiation flux (6) in November–April in the Kara Sea for 1980–2016 according to observation and reanalysis data ERA5; smoothing for 3 years (7–8);  $r$  — correlation coefficient after trend deleting

Среднегодовая приповерхностная температура воздуха за весь рассматриваемый период с 1979 по 2019 г. возросла в среднем на  $4,4 \pm 0,6$  °С: коэффициент линейного тренда до 2000 г. составил  $0,02$  °С/год и  $0,19$  °С/год после 2000 г. Наиболее сильный рост температуры воздуха приходится на зимний период,  $5,6 \pm 1,1$  °С ( $-0,06$  °С/год до 2000 г. и  $0,27$  °С/год после 2000 г.), а в летний период —  $2,0 \pm 0,3$  °С ( $+0,02$  °С/год до 2000 г. и  $0,11$  °С/год после 2000 г.). Увеличение темпов потепления с конца XX в. может являться следствием целого ряда факторов. К примеру, в работе [16] обсуждается смена режимов атмосферной циркуляции в Арктике и изменение треков циклонов в сторону Карского моря после 2000 г., что увеличивает приток тепла и, следовательно, приземную температуру воздуха. Алексеев и др. [9] связывают ускорение потепления с увеличением адвекции тепла из низких широт.

Площадь льда в Карском море сократилась за рассматриваемые годы на  $209,2 \pm 24,0$  тыс. км<sup>2</sup> ( $-1,9 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>/год до 2000 г. и  $-7,7 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>/год после 2000 г.) — это 10,5 % от общего сокращения площади льда в Арктике. Сокращение средней площади в зимний период составило  $65,5 \pm 10,3$  тыс. км<sup>2</sup> ( $-0,2 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>/год до 2000 г. и  $-3,4 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>/год после 2000 г.) — 4,3 % от общего сокращения площади льда в Арктике, в летний площадь льда уменьшилась на  $385,6 \pm 44,8$  тыс. км<sup>2</sup> ( $-3,7 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>/год до 2000 г. и  $-9,9 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>/год после 2000 г.) — 12,2 % от летнего сокращения по Арктике.

Содержание водяного пара играет важную роль в зимнем потеплении, увеличивая поток нисходящего излучения, повышая приповерхностную температуру воздуха [12–15] и, следовательно, уменьшая сумму градусо-дней мороза (рис. 1б). Поток нисходящей длинноволновой радиации возрос на  $18,2 \pm 2,3$  Вт/м<sup>2</sup> за весь рассматриваемый период с 1979 по 2019 г., а в зимний период это изменение составило  $24,8 \pm 4,9$  Вт/м<sup>2</sup>. До 2000 г. наблюдалось незначительное уменьшение потока на  $0,5$  Вт/м<sup>2</sup> в год, а после 2000 г. наблюдался рост на  $1,2$  Вт/м<sup>2</sup> в год. Толщина припая

Таблица 1

**Коэффициенты корреляции между приповерхностной температурой воздуха и площадью морского льда за период с 1979 по 2019 г. после удаления тренда из данных и сглаживания скользящим средним по 3 года**

Table 1

**Correlation coefficients between surface air temperature and sea ice area for the period from 1979 to 2019 after removing the trend from the data and smoothing**

Параметры/Месяцы	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Приповерхностная температура воздуха и площадь морского льда	-0,71	-0,57	-0,63	-0,91

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции между приповерхностной температурой воздуха и площадью морского льда после удаления тренда из данных и сглаживания скользящим средним по 3 года**

Table 2

**Correlation coefficients after removing the trend from the data and smoothing between surface air temperature and sea ice area**

Параметры/Месяцы		6	7	8	9	10
Приповерхностная температура воздуха и площадь морского льда	до 2000 г.	-0,49	-0,69	-0,51	-0,56	-0,92
	после 2000 г.	-0,84	-0,71	-0,65	-0,77	-0,94

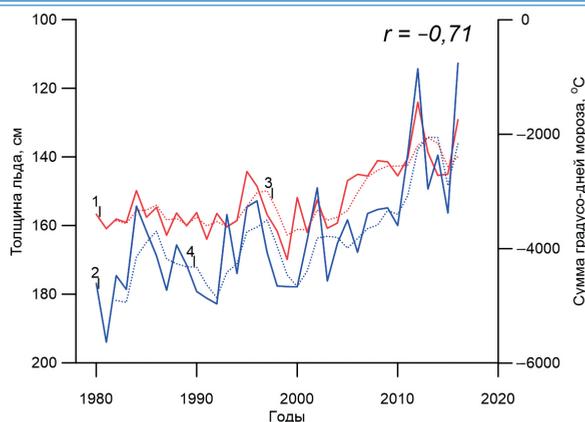


Рис. 2. Межгодовая изменчивость суммы градусо-дней мороза за ноябрь–апрель (1) и максимальной толщины припая (2) в Карском море за период с 1980 по 2016 г. по данным наблюдений за толщиной припая и реанализа ERA5; сглаживание по 3 года (3–4);  $r$  — коэффициент корреляции после удаления тренда

Fig. 2. Interannual variability sum of frost degree days (1) and maximum ice thickness (2) in the Kara Sea for the period December–February from 1980 to 2016 according to observations of maximum ice thickness and ERA5 reanalysis; smoothing for 3 years (3–4);  $r$  — correlation coefficient after trend deleting

по данным наблюдений на станциях за 37 лет (с 1980 по 2016 г.) уменьшилась на  $30,7 \pm 3,9$  см (на 0,4 см/год до 2000 г. и на 2,6 см/год после) (рис. 2).

Связь приповерхностной температуры воздуха и площади морского льда наиболее отчетливо прослеживается с июня по октябрь с корреляцией между ними от  $-0,76$  до  $-0,89$  и остается значимой после удаления тренда (табл. 1).

Разница в темпах потепления очевидна, и потому периоды с 1979 по 2000 г. и с 2000 по 2019 г. были рассмотрены при анализе корреляционной зависимости по отдельности (табл. 2).

Связь толщины припая и сумм градусо-дней мороза отражена на рис. 2. Отметим, что средние по акватории Карского моря суммы градусо-дней мороза, рассчитанные по данным реанализа ERA5, показали хорошую согласованность  $r = 0,72$  после удаления тренда с натурными данными прибрежных метеорологических станций (м. Стерлегова, м. Голомянный, о. Белый, о. Визе, Марресале, Диксон). Однако систематическое расхождение между суммами градусо-дней мороза по реанализу и по данным наблюдений на станциях составило около 1000 градусо-дней. Причина в том, что ячейки сетки ERA5 включают не только метеостанции, но и прилегающую акваторию Карского моря, которая в целом теплее побережья. Низко- и высокочастотная изменчивость данных реанализа и данных наблюдений совпадают. Поэтому корреляция после удаления тренда между суммами градусо-дней мороза и толщинами льда по наблюдениям на станциях составляет  $-0,75$ , а с ERA5 —  $-0,80$ .

### ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ШИРОТ НА КЛИМАТ И ЛЕД В КАРСКОМ МОРЕ

Влияние температуры поверхности океана в низких широтах Северной Атлантики на климатические характеристики в Баренцевом море [17] и в Арктике [18, 19] позволяет сделать предположение о распространении этого влияния также и на регион Карского моря.

В результате расчетов кросс-корреляции была выделена зависимость между аномалиями температуры поверхности океана в тропической части Северной Ат-

**Коэффициенты корреляции площади морского льда в летние месяцы в Карском море и аномалий температуры поверхности океана в тропической области Северной Атлантики в осенние месяцы**

Table 3

**Correlation coefficients of sea ice area in summer months in the Kara Sea and ocean surface temperature anomalies in the tropical region of the North Atlantic in autumn months**

Месяцы	Июнь	Июль	Август
Сентябрь	-0,34 (30)	-0,55 (31)	-0,47 (32)
Октябрь	-0,44 (31)	-0,69 (32)	-0,64 (33)
Ноябрь	-0,33 (32)	-0,55 (33)	-0,52 (34)

*Примечание.* В скобках приведено запаздывание отклика в месяцах.

*Note.* The response lag, in months, is given in brackets.

лантики (область 5–25° с. ш., 60–10° з. д.) в осенние месяцы и площадью льда в Карском море в летние месяцы (табл. 3).

Максимальный лаг, то есть время запаздывания отклика аномалий площади морского льда в Карском море на изменения температуры поверхности океана в тропической части Северной Атлантики, составляет 30–34 месяца между температурой поверхности океана в октябре и площадью морского льда в июне–августе.

Полученный результат хорошо согласуется с выводами статьи [10] о времени запаздывания отклика площади льда в Баренцевом море, составляющем 27–32 месяца между аномалиями температуры поверхности океана в октябре и льдом в январе–июне.

При учете обнаруженного запаздывания отклика и удалении шума сглаживанием рядов по 3 года аномалии температуры поверхности океана в низких широтах обнаруживают согласованность низкочастотных колебаний с аномалиями площади льда в Карском море в июле (рис. 3).

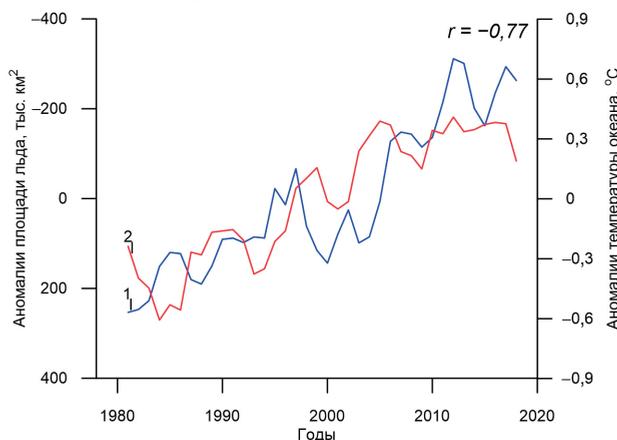


Рис. 3. Площадь морского льда в Карском море в июле (1) и температура поверхности океана тропической области Северной Атлантики в октябре (2), с учетом запаздывания сигнала  $\tau = 32$  месяца и сглаживания

Fig. 3. Ocean surface temperature of the tropical region of the North Atlantic in October (red) and the sea ice area in the Kara Sea in July (blue), taking into account the signal delay  $\tau = 32$  months and smoothing

**МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПЛОЩАДИ ЛЬДА КАРСКОГО МОРЯ  
НА ОСНОВЕ СВЯЗИ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КЛИМАТА**

Выше было показано, что суммы градусо-дней мороза являются определяющим фактором для толщины льда в зимний период. Однако они опосредованно влияют также и на его площадь: при меньшей толщине льда летнее сокращение его площади будет происходить стремительнее при прочих равных условиях. Так, суммы градусо-дней мороза за ноябрь–апрель и площади льда в августе связаны в 1980–2016 гг. коэффициентом корреляции  $-0,76$  после сглаживания и удаления тренда, что позволяет построить регрессионную зависимость между суммами градусо-дней мороза и площадью льда в августе в Карском море. Полученная зависимость позволяет прогнозировать площадь морского льда с заблаговременностью 3 месяца:

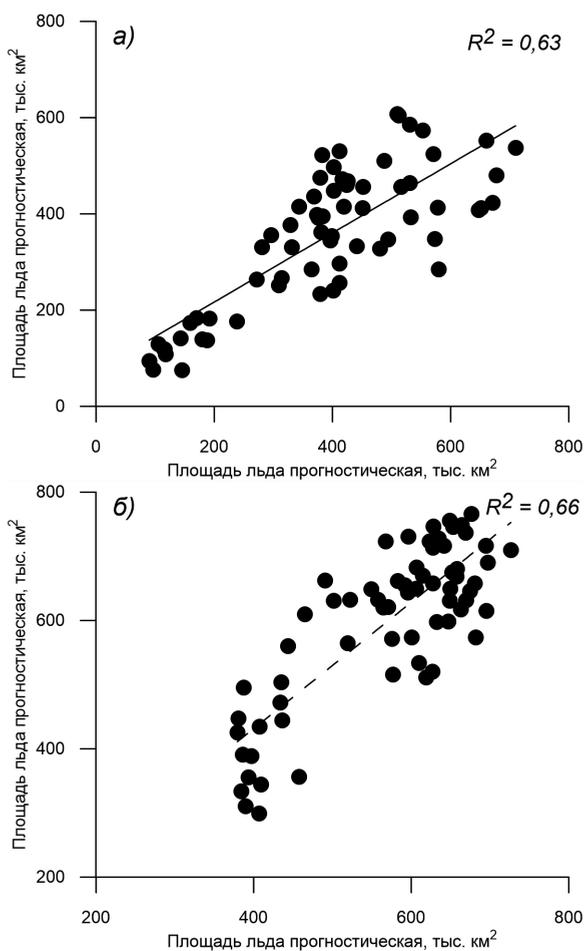


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования на основе а) сумм градусо-дней мороза; б) аномалий температуры поверхности океан в низких широтах;  $R^2$  — коэффициент детерминации  
Fig. 4. Comparison of simulation results based on а) sums of frost degree-days; б) ocean surface temperature anomalies at low latitudes;  $R^2$  is the coefficient of determination

$$\text{ПМЛ}_{\text{VIII}} = 1.641 \cdot 10^{-12} \cdot \text{СГДМ}_{\text{XI-IV}}^{4,006},$$

где  $\text{ПМЛ}_{\text{VIII}}$  — площадь морского льда в августе, тыс. км<sup>2</sup>;  $\text{СГДМ}_{\text{XI-IV}}$  — сумма градусо-дней мороза за период с ноября по апрель, °С.

Учитывая показанное выше влияние аномалий температуры поверхности океана в Атлантике на климатические условия в Карском море, можно повысить заблаговременность прогноза площади морского льда до 3 лет:

$$\text{ПМЛ}_{\text{VII}} = -361,12 \cdot \text{АТПО},$$

где  $\text{ПМЛ}_{\text{VII}}$  — аномалия от средней площади морского льда в июле в Карском море, тыс. км<sup>2</sup>; АТПО — аномалии от средней температуры поверхности океана в тропической области Северной Атлантики в октябре, °С.

Для оценки качества представленных моделей был использован доступный архив данных площади морского льда в Карском море с 1950 г. по настоящее время (рис. 4).

Средняя оценка качества долгосрочных прогнозов рассчитывалась по критерию оправдываемости, который определяется ошибкой прогноза и среднеквадратическим отклонением фактической площади морского льда. Метод предполагает сравнение каждого полученного значения по модели с каждым фактическим значением, после чего разница сравнивается с критерием оправдываемости и, если ошибка менее этого критерия, то значению присваивается 100 %, если более, то 0 % [20, с. 114]. Средняя оценка качества прогноза площади морского льда в августе по суммам градусо-дней мороза составила 80 %, по температуре поверхности океана в тропической области Северной Атлантики — 80 %.

## ВЫВОДЫ

В работе приведены оценки изменения климатических и ледовых условий Карского моря, а также получены количественные оценки влияния метеорологических параметров на ледовые условия.

Влияние изменений климата на толщину и площадь льда Карского моря проявляется в периоды нарастания и таяния морского льда, которые во многом определяются температурным режимом. В летний период таяние морского льда в значительной степени обусловлено изменениями приповерхностной температуры воздуха (коэффициент корреляции от  $-0,57$  до  $-0,91$ ). В зимний период толщина льда зависит от сумм градусо-дней мороза ( $r = -0,80$ ). Температурный режим в свою очередь определяется радиационным балансом, а именно изменчивостью в длинноволновом потоке за счет увеличения содержания водяного пара.

Установлено удаленное влияние аномалий температуры поверхности океана в тропической области Северной Атлантики на площадь льда Карского моря. При этом реакция площади льда в июле–августе отстает на 30–34 месяца от соответствующих аномалий температуры поверхности океана в сентябре–ноябре.

Построены регрессионные модели зависимости летней площади морского льда от зимней суммы градусо-дней мороза и аномалий температуры поверхности океана в низких широтах. Модель зависимости площади морского льда в августе в Карском море от сумм градусо-дней мороза в ноябре–апреле позволяет воспроизводить низкочастотную изменчивость с заблаговременностью 3 месяца. Модель зависимости площади морского льда в июле в Карском море от аномалий температуры поверхности океана в низких широтах в октябре позволяет воспроизводить низкочастотную изменчивость с заблаговременностью 32 месяца. Обе модели являются эффективными и статистически значимыми.

**Конфликт интересов.** Конфликт интересов отсутствует.

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке РФФИ по проектам 18-05-00334, 18-05-60107.

**Благодарности.** Автор признательна А.В. Юлину и Е.А. Павловой (отдел ледовых прогнозов ФГБУ «ААНИИ») за предоставленные данные по толщине припая.

**Competing interests.** The author has no competing interests.

**Funding.** The article was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grants 18-05-00334, 18-05-60107).

**Acknowledgments.** The author is grateful to A.V. Yulin and E. A. Pavlova (State Scientific Center “AARI”, Ice Forecasting Department) for the data provided on fast ice thickness.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Специальный отчет IPCC об океане и атмосфере в изменяющемся климате. URL: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/> (дата обращения 05.03.2022).
2. Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // Лед и снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 381–390.
3. Stroeve J., Notz D. Changing state of Arctic sea ice across all seasons // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. № 10. P. 103001.
4. Lindsay R., Schweiger A. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations // Cryosphere. 2015. V. 9. № 1. P. 269–283.
5. Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss // Journal of Climate. 2018. V. 31. № 12. P. 4917–4932.
6. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Yulin A.V. Long-term ice variability in Arctic marginal seas // Journal of Climate. 2003. V. 16. № 12. P. 2078–2085.
7. Захаров В.Ф., Малинин В.Н. Морские льды и климат. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 92 с.
8. Визе В.Ю. Моря Советской Арктики: Очерки по истории исследования. 2 изд., доп. Л.: Главсевморпуть, 1939. 568 с.
9. Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на потепление в Арктике в зимний период // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 43–63.
10. Глок Н.И., Алексеев Г.В., Вязилова А.Е. Сезонный прогноз ледовитости Баренцева моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 1. С. 5–14.
11. Данные реанализа ERA5. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (дата обращения 05.03.2022).
12. Данные по морскому льду. URL: [http://wdc.aari.ru/datasets/d0005/txt/kara\\_all.txt](http://wdc.aari.ru/datasets/d0005/txt/kara_all.txt) (дата обращения 05.03.2022).
13. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 320 с.
14. Доронин Ю.П., Кубышкин Н.В. Рост и таяние морского льда. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 44 с.
15. Зубов Н.Н. Льды Арктики. М.: Изд. Главсевморпути, 1944. 396 с.
16. Proshutinsky A., Dukhovskoy D., Timmermans M. L., Krishfield R., Bamber J.L. Arctic circulation regimes // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. T. 373. № 2052. C. 20140160.

17. Алексеев Г.В., Глок Н.И., Смирнов А.В., Вязилова А.Е. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в районе Баренцева моря и их предсказуемость // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 8. С. 38–56.
18. *Alekseev G.V., Glok N.I., Vyazilova A.E., Kharlanenkova N.E.* Climate change in the Arctic: causes and mechanisms // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2020. V. 606. № 1. P. 012002.
19. *Alekseev G.V., Glok N.I., Vyazilova A.E., Kharlanenkova N.E., Kulakov M.Y.* Influence of SST in low latitudes on the arctic warming and sea ice // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. V. 9. № 10. P. 1145.
20. РД 52.27. 759–2011. Наставление по службе прогнозов, раздел 3, часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. 188 с.

## REFERENCES

1. Special report IPCC on the ocean and cryosphere in the changing climate. Available at: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/> (accessed 05.03.2022).
2. *Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V.* Influence of Atlantic on the warming and reduction of sea ice in the Arctic. *L'ody i sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 381–390. [In Russian].
3. *Stroeve J., Notz D.* Changing state of Arctic sea ice across all seasons. *Environmental Research Letters*. 2018, 13 (10): 103001.
4. *Lindsay R., Schweiger A.* Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations. *Cryosphere*. 2015, 9 (1): 269–283.
5. *Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C.* Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss. *Journal of Climate*. 2018, 31 (12): 4917–4932.
6. *Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Yulin A.V.* Long-term ice variability in Arctic marginal seas. *Journal of Climate*. 2003, 16 (12): 2078–2085.
7. *Zakharov V.F., Malinin V.N.* *Morskije l'dy i klimat*. Sea ice and climate. St. Petersburg: Gigrometeoizdat, 2000: 92 p. [In Russian].
8. *Vize V.Yu.* *Morya Sovetskoj Arktiki: Oчерki po istorii issledovaniya*. 2 izd., dop. Seas of the Soviet Arctic: Essays on the History of Research. 2nd ed., Add. Leningrad: Glavsevmorput', 1939: 568 p. [In Russian].
9. *Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Urazgildeeva A.V., Bobylev L.P.* The influence of atmospheric transport of heat and moisture to enhance the warming in the Arctic in winter. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2016, 1: 43–63. [In Russian].
10. *Glock N.I., Alekseev G.V., Vyazilova A.E.* Seasonal forecast of sea ice extent in the Barents Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (1): 5–14. [In Russian].
11. Reanalysis dataset ERA5. Available at: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (accessed 05.03.2022).
12. Sea ice dataset. Available at: [http://wdc.aari.ru/datasets/d0005/txt/kara\\_all.txt](http://wdc.aari.ru/datasets/d0005/txt/kara_all.txt) (accessed 05.03.2022).
13. *Doronin Yu.P., Kheisin D.E.* *Morskoj led*. Sea ice. Leningrad: Gigrometeoizdat, 1975: 320 p. [In Russian].
14. *Doronin Yu.P., Kubyshkin N.V.* *Rost i tayanie morskogo l'da*. Growth and melting of sea ice. St. Petersburg: Gigrometeoizdat, 2001: 44 p. [In Russian].
15. *Zubov N.N.* *L'dy Arktiki*. Arctic ice. Moscow: Ed. Glavsevmorput, 1944: 396 p. [In Russian].

16. Proshutinsky A., Dukhovskoy D., Timmermans M.L., Krishfield R., Bamber J.L. Arctic circulation regimes. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015, 373 (2052): 20140160.
17. Alekseev G.V., Glock N.I., Smirnov A.V., Vyazilova A.E. The influence of the North Atlantic on climate variations in the Barents Sea and their predictability. *Meteorologiya i gidrologiya. Meteorology and hydrology*. 2016, 8: 38–56. [In Russian].
18. Alekseev G.V., Glok N.I., Vyazilova A.E., Kharlanenkova N.E. Climate change in the Arctic: causes and mechanisms. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 606 (1): 012002.
19. Alekseev G.V., Glok N.I., Vyazilova A.E., Kharlanenkova N.E., Kulakov M.Y. Influence of SST in low latitudes on the arctic warming and sea ice. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021, 9 (10): 1145.
20. GD 52.27. 759–2011 *Nastavlenie po sluzhbe prognozov, razdel 3, chast' III, Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov*. Forecast Service Manual, Section 3, Part III, Marine Hydrological Forecast Service. Moscow: TRIADA LTD, 2011: 188 p. [In Russian].