

## Ледовитость арктических морей и её связь с приземной температурой воздуха в Северном полушарии

© 2020 г. Т.А. Матвеева<sup>1,2\*</sup>, В.А. Семенов<sup>1,2</sup>, Е.С. Астафьева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия; <sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

\*matveeva.tatiana@igras.ru

### Arctic sea ice coverage and its relation to the surface air temperature in the Northern Hemisphere

T.A. Matveeva<sup>1,2\*</sup>, V.A. Semenov<sup>1,2</sup>, E.S. Astafyeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <sup>2</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*matveeva.tatiana@igras.ru

Received May 15, 2019 / Revised August 29, 2019 / Accepted December 13, 2019

**Keywords:** *Arctic climate, Arctic sea ice coverage, climate variability, surface air temperature.*

#### Summary

The linear relationship between average monthly anomalies of the ice coverage in the Arctic seas and the surface air temperature over the land in the Northern hemisphere in March and September was analyzed for the purpose of finding regions with statistically significant correlations. Possible mechanisms of the revealed interrelations are discussed. Data on the surface temperature and the ice concentration from Met Office Hadley Centre were used in this study. A negative correlation of the sea ice with the temperature in the land regions adjacent to the seas, as well as a number of remote relations was revealed. Specifically, statistically significant relations were found between anomalies of the ice area in the Laptev Sea in September with the temperature anomalies in the Mediterranean region, as well as with the temperature anomalies in Central Asia. In most cases, such relationships may be explained by the influence of atmospheric circulation, including the North Atlantic Oscillation, the Arctic Oscillation, the Pacific Decadal Oscillation, and variability in the intensity of the atmospheric centers of action. Characteristics of seasonal variations of the sea ice coverage and climatic trends together with variability and autocorrelation of the coverage anomalies are considered. The largest reduction in the ice area is observed for the recent decades in the Barents Sea in winter while in the Kara, Laptev and East Siberian seas - in summer.

**Citation:** Matveeva T.A., Semenov V.A., Astafyeva E.S. Arctic sea ice coverage and its relation to the surface air temperature in the Northern Hemisphere. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020. 60 (1): 134–148. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420010029.

Поступила 15 мая 2019 г. / После доработки 29 августа 2019 г. / Принята к печати 13 декабря 2019 г.

**Ключевые слова:** *арктические морские льды, изменчивость климата, климат Арктики, приземная температура воздуха.*

Проанализирована линейная связь среднемесячных аномалий площади морского льда в арктических морях и приземной температуры воздуха над сушей Северного полушария в марте и сентябре. Установлена отрицательная корреляция с температурой в прилегающих к морям регионах суши, а также ряд удалённых связей, которые можно объяснить влиянием атмосферной циркуляции. Наибольшее сокращение площади морских льдов зимой в последние десятилетия наблюдаются в Баренцевом море, в летний – в Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях.

#### Введение

Одно из самых ярких проявлений происходящих изменений климата – стремительное сокращение арктических морских льдов в последние десятилетия [1–3]. Арктический морской лёд не только служит индикатором изменений климата, но и играет ключевую роль в важных обратных связях в земной климатической системе [1]. Площадь и толщина ледяного покрова модулируют потоки тепла на границе

океан–атмосфера и связаны с изменениями атмосферной, океанической циркуляции и радиационным балансом. Арктический морской лёд относится к важному компоненту арктического гидрологического цикла [1, 4]. С 1979 г., когда началось непрерывное спутниковое зондирование ледяного покрова, площадь арктического морского льда в сентябре (месяц климатологического минимума *площади морского льда*, ПМЛ) сокращалась примерно на 11% за десятилетие, а в начале XXI в. темпы сокращения ускорились

почти вдвое [3, 5]. Зимой относительное сокращение ПМЛ не так велико, как летом (около 3%/десятилетие), но из-за большей площади покрытия абсолютные изменения сравнимы с летними [6]. При этом отметим, что значительные турбулентные потоки тепла из океана в атмосферу зимой (достигающие  $1000 \text{ Вт/м}^2$  [7]) существенно влияют на температуру и содержание водяного пара в нижней тропосфере Арктики, а также на циркуляцию атмосферы [8, 9].

Реконструкции ледовых условий показывают, что современное сокращение площади арктических морских льдов – беспрецедентное в течение последнего тысячелетия [2, 10]. Современные модели климата воспроизводят наблюдаемое сокращение ПМЛ как отклик на антропогенное воздействие, прежде всего увеличение содержания парниковых газов в атмосфере, хотя заметно недооценивают и ускоренное таяние морских льдов в последнее десятилетие. Результаты разных моделей характеризуются большим разбросом [5].

Лёд и приповерхностная температура воздуха тесно связаны [11]. Колебания температуры и соответствующие им изменения влажности воздуха влияют на морской лёд через потоки турбулентного тепла и длинноволновой радиации на границе лёд–атмосфера. В свою очередь концентрация льда также влияет на температуру приземного воздуха путём модуляции турбулентных потоков из океана в атмосферу. Вклад сокращения концентрации морского льда (КМЛ) в изменение температуры арктической атмосферы проявляется в значительно более сильном потеплении у поверхности [12]. Сокращение арктического морского льда в период спутниковых наблюдений совпало с увеличением средней температуры воздуха у поверхности в Арктике, причём за последние 30 лет это повышение происходило, как минимум, в два раза быстрее глобального потепления [13]. Такая особенность получила название *Арктического усиления* [14].

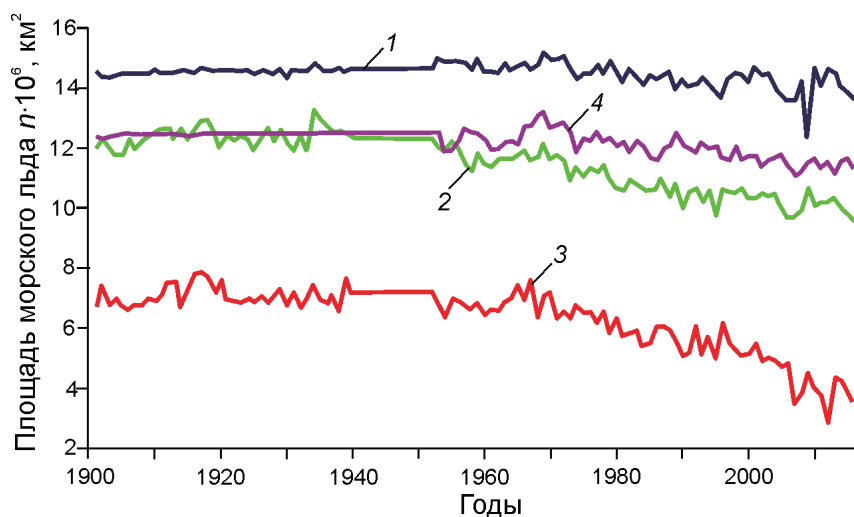
Современное арктическое потепление с 1970-х годов последовало за периодом похолодания в 1940–60-х годах, которому предшествовало потепление середины XX в. [15, 16]. Значительная мультидекадная изменчивость в Арктике в XX в. отмечается как в инструментальных наблюдениях за температурой воздуха на высокоширотных метеорологических станциях, так и в региональных данных по ледовитости арктических морей в

XX в., и в реконструкциях площади распространения морских льдов в атлантическом секторе Арктики за последнее тысячелетие [15, 17–19]. В результате значительных долгопериодных колебаний климата в Арктике оценка климатических трендов температуры существенно зависит от выбора периода тренда [20].

Данные о распространении арктических морских льдов в доспутниковую эпоху характеризуются фрагментарностью и неоднородностью. Сведения до 1930-х годов – это в основном наблюдения с берега и судов, причём преимущественно в тёплую половину года. Период 1930–40-х годов дополнен нерегулярными наблюдениями с самолётов, но имеет пропуски в период Второй мировой войны. С 1950-х годов появились достаточно регулярные данные воздушной разведки, а также дрейфующих буёв в течение всего года, что позволило создать сеточный архив данных по концентрации морских льдов в Арктике с 1953 г. [21]. Позднее этот архив был расширен в прошлое до 1870 г. [22, 23], однако данные до 1953 г. остаются нереалистичными и их нельзя использовать для анализа изменчивости климата [15].

Пассивное микроволновое зондирование со спутников позволяет получить достоверные оценки изменчивости и климатических трендов площади арктического морского льда [24]. Но такие оценки зависят от используемого алгоритма обработки спутниковых данных, что может приводить к разбросу между среднемесячными значениями площади морского льда до 10%, хотя климатические тренды в целом хорошо согласуются [25].

Для оценки роли изменчивости площади арктических морских льдов в изменениях климата и лучшего понимания механизмов формирования таких изменений необходимо оценить связь изменений площади льдов и температуры над континентами Северного полушария. Поскольку данные по температуре до начала эры спутникового зондирования более полные, чем по концентрации морских льдов, эту связь можно применять для реконструкции ПМЛ в историческом прошлом [15, 26, 27]. При этом, как правило, используются осреднённые для всей Арктики значения ПМЛ и средние для высоких широт аномалии приземной температуры, которые в период надёжных наблюдений показывают согласованные изменения [26, 27]. Анализ осреднённых



**Рис. 1.** Площадь морского льда (в  $10^6$  км<sup>2</sup>) в Северном полушарии по данным архива HadISST1 за период 1870–2016 г. для:

1 – марта; 2 – июня; 3 – сентября; 4 – декабря

**Fig. 1.** Sea ice area time series ( $10^6$  км<sup>2</sup>) for the Northern Hemisphere from 1870 to 2016 (based on HadISST1 SIC data) for:

1 – March; 2 – June; 3 – September; 4 – December

значений не позволяет выделить типичную пространственную структуру взаимосвязанных изменений концентрации морских льдов и температуры воздуха над континентами, которая из-за взаимодействия с атмосферной циркуляцией может характеризоваться не только ожидаемым потеплением при сокращении площади морских льдов, но и похолоданием [9]. Так, похолодание зимой над Северной Евразией в начале XXI в., сопровождаемое увеличением изменчивости температуры [28], может быть связано с сокращением ПМЛ в Баренцевом море [9, 15].

В настоящей работе анализируется линейная связь аномалий ПМЛ в арктических морях и приземной температуры воздуха над сушей Северного полушария в марте и сентябре с целью установления регионов со статистически значимыми корреляциями; обсуждаются и возможные механизмы таких связей. Показаны изменения площади покрытия арктических морей с 1953 г., анализируется их вариабельность и рассматриваются другие характеристики.

### Используемые данные и методы

В качестве источника данных о концентрации морских льдов мы использовали архив HadISST1 Центра Гадлея (Великобритания), который включает в себя сеточные среднемесячные данные по концентрации морского льда и температуре поверхности океана с шагом сетки  $1^\circ \times 1^\circ$  за период с 1870 г. по настоящее время [23]. Данные о концентрации морских льдов архива

HadISST1 содержат информацию из различных источников, среди которых – ледовые карты некоторых национальных метеорологических институтов, судовые наблюдения, данные пассивного микроволнового зондирования. Сведения за период до 1953 г. имеют существенные пропуски в годы ограниченных наблюдений, в частности во время Второй мировой войны, особенно в зимний период [15, 23]. Климатические изменения площади морского льда за 1870–2016 гг. по данным HadISST1 для разных сезонов приведены на рис. 1. Хорошо видны периоды с нулевой и низкой изменчивостью площади морского льда, когда из-за отсутствия данных использованы климатологические значения. Данные о *приповерхностной температуре воздуха* (ПТВ) над сушей получены с помощью базы данных CRU TS [29]. Архив содержит среднемесячные значения температуры воздуха по данным 5583 метеорологических станций с 1901 по 2016 г., интерполированные в узлы сетки с шагом  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ . ПТВ – один из параметров, имеющих длинные ряды наблюдений, но отметим значительную пространственную и временную неоднородность покрытия данными наблюдений, особенно в Арктическом регионе [13].

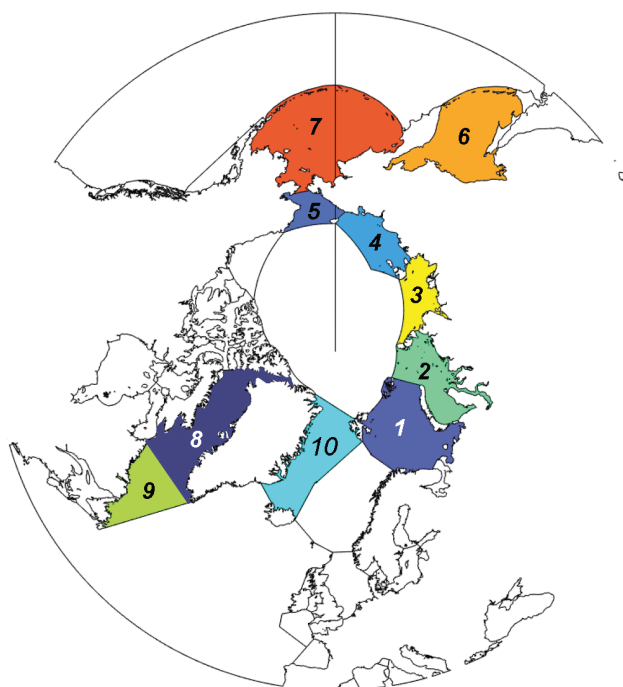
В отличие от многих исследований, где анализируется *площадь распространения морского льда* (ПРМЛ), которая включает в себя участки (ячейки) со сплочённостью морских льдов больше 15%, нами в качестве характеристики покрытия морей морскими льдами использовалась *площадь морских льдов* (ПМЛ). Использование ПРМЛ позволяет уменьшить ошибки,

связанные с неопределённостью данных наблюдений. Существенный недостаток использования ПРМЛ – потеря информация о концентрации морских льдов в пределах выбранной границы распространения морских льдов (от 15% и выше). В этом диапазоне могут наблюдаться значительные изменения концентрации морских льдов, влияющие на модуляцию турбулентных потоков тепла на границе океан–атмосфера (особенно в зимний период).

Ввиду хорошо выраженных естественных географических границ и соображений практического применения полученных результатов в настоящей работе анализировались данные для следующих арктических морей: Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, Охотского, Берингова, Баффина, Лабрадор и Гренландского. Границы морей на широтно-долготной сетке  $1^\circ \times 1^\circ$  (архив HadISST1) приведены на рис. 2. В табл. 1 указаны площади морей, а также основные характеристики ПМЛ в анализируемых морях для марта и сентября: а) среднее значение и среднеквадратичное отклонение для базового периода 1981–2000 гг.; б) линейный тренд в период спутниковых наблюдений с 1979 по 2016 г.

При анализе использованы данные о концентрации морских льдов для марта и сентября – соответственно максимума и минимума среднеклиматического сезонного хода площади морского льда для всей Арктики. На рис. 3 представлен средний за период 1981–2000 гг. сезонный ход ПМЛ для анализируемых арктических морей. моря разделены на две группы с максимальной ПМЛ: от 0,7 до 1,0 млн км<sup>2</sup> (см. рис. 3, а) и от 0,3 до 0,6 млн км<sup>2</sup> (см. рис. 3, б). Наибольших значений ПМЛ достигает в период с февраля по апрель, ряд морей (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское) почти полностью покрыт морскими льдами в течение нескольких месяцев холодного периода. В апреле–мае площади покрытия морей льдом резко сокращаются, достигая минимума в августе–сентябре; в течение нескольких месяцев тёплого периода некоторые моря (Охотское, Лабрадор, Берингово) полностью свободны ото льда.

Выявление пространственной структуры связи температуры воздуха на суше и ПМЛ в морях выполнялось с помощью корреляционного анализа (коэффициент корреляции Пир-



**Рис. 2.** Границы морей арктической зоны, использованные в исследовании:

1 – Баренцево; 2 – Карское; 3 – Лаптевых; 4 – Восточно-Сибирское; 5 – Чукотское; 6 – Охотское; 7 – Берингово; 8 – Баффина; 9 – Лабрадор; 10 – Гренландское

**Fig. 2.** The boundaries of the seas of the Arctic zone used in the study:

1 – Barents; 2 – Kara; 3 – Laptev; 4 – East Siberian; 5 – Chukchi; 6 – Okhotsk; 7 – Bering; 8 – Baffin; 9 – Labrador; 10 – Greenland

сона) за период 1953–2016 гг. Для исключения долгопериодной климатической изменчивости из рядов температуры воздуха и ПМЛ в морях был убран линейный тренд, т.е. анализировались связи только между изменчивостью исследуемых параметров на межгодовом и десятилетнем временных масштабах. Для ряда морей (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское) корреляционный анализ проводили только для сентября, поскольку изменчивость ПМЛ в марте не превышала 5%. Для морей, которые почти свободны ото льда в сентябре (Баренцево, Охотское, Берингово, Лабрадор), анализировались только связи ПТВ и ПМЛ в марте.

Поскольку ряды используемых данных автокоррелированы, была выполнена оценка значимости полученных коэффициентов корреляции на основе *t*-критерия Стьюдента с учётом автокорреляции по следующей методике. Для учёта автокорреляции временных рядов при оценке

Таблица 1. Основные характеристики площади покрытия льдом арктических морей для марта (числитель) и сентября (знаменатель)

Море	Площадь моря*, млн км <sup>2</sup>	Средняя площадь покрытия льдом (1981–2000 гг.), тыс. км <sup>2</sup>	Тренд (1979–2016 гг.), тыс. км <sup>2</sup> /10 лет	СКО (1981–2000 гг.), тыс. км <sup>2</sup>
Баренцево	1,62	744,6/47,2	–81,9/–8,1	131,8/41,6
Карское	0,98	898,5/146,2	–8,9/–44,0	10,6/96,0
Лаптевых	0,68	544,2/117,0	0,3/–29,8	3,5/74,0
Восточно-Сибирское	0,99	688,6/223,6	–0,1/–92,7	4,0/134,3
Чукотское	0,64	344,8/19,4	0,3/–6,8	4,7/23,4
Берингово	2,21	557,1/0,6	13,3/–0,5	88,6/0,6
Охотское	1,58	826,1/0	–73,6/0	130,0/0
Баффина	1,36	1001,3/39,8	0,6/–4,7	91,1/17,4
Лабрадор	0,83	243,2/0	11,8/0	68,6/0
Гренландское	1,27	538,5/196,1	–3,1/4,7	74,3/72,4

\*По используемой в работе маске на сетке 1° × 1°, см. рис. 2.

значимости рассчитывалось эффективное число независимых значений  $N_{eff}$ :

$$N_{eff} = n(1 - r_1)/(1 + r_1),$$

где  $n$  – число элементов в выборке;  $r_1$  – коэффициент автокорреляции со сдвигом 1.

Далее оценивалась значимость (на 90%-м уровне) коэффициента корреляции на основе  $t$ -критерия Стьюдента с использованием  $N_{eff}$ :

$$t = r(1 - r^2)^{-0,5}(N_{eff} - 2)^{0,5}.$$

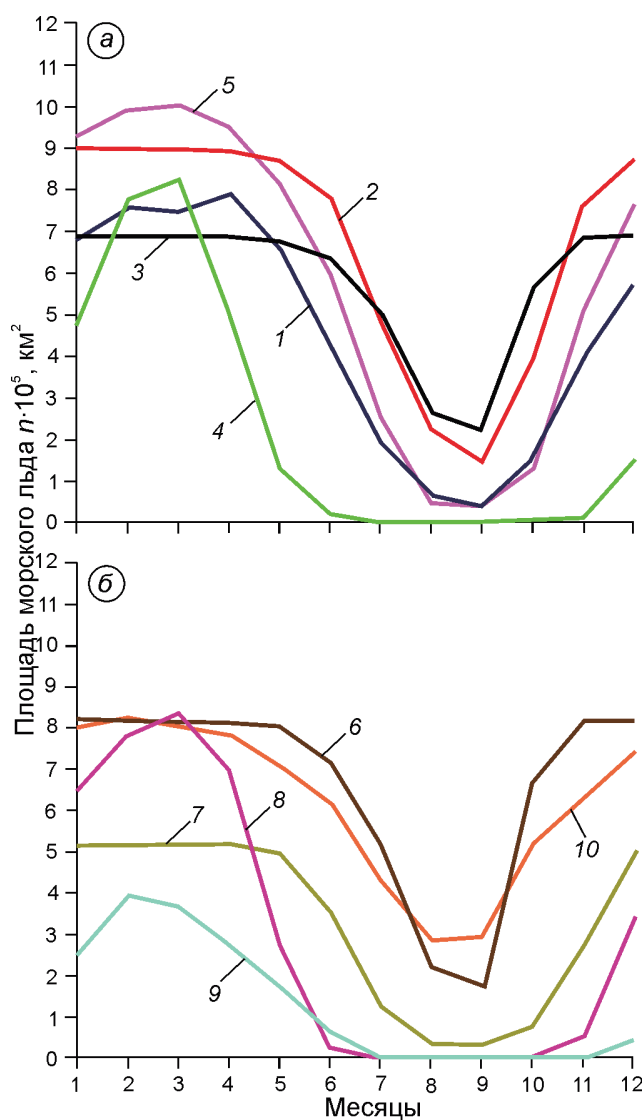
Корреляционный анализ между ПМЛ и температурой воздуха над сушей проводился как для исходных рядов, так и для рядов, сглаженных пятилетним скользящим средним. Картина распределения корреляций ПМЛ и температуры по исходным данным и по данным, сглаженным пятилетним скользящим средним, существенно не отличается, но корреляции сглаженных рядов выше с большими областями статистически значимых показателей, поэтому они использованы для иллюстраций. Корреляционный анализ выполнялся только для морей, где изменчивость ПМЛ в сентябре или в марте составляла более 5% общей площади моря.

## Результаты

**Автокорреляционный анализ площади распространения морского льда.** Важная характеристика для прогноза динамики площади морского льда – коэффициент автокорреляции. Для морского льда коэффициент автокорреляции, как

правило, становится незначимым уже на сдвигах в два и более месяца, что показано ещё в работе [30]. Несмотря на достигнутый прогресс, динамические модели прогноза, как правило, тоже не выходят за этот предел естественной предсказуемости [31]. Такую тенденцию подтверждает выполненный автокорреляционный анализ рядов среднемесячных аномалий ПМЛ (относительно среднеклиматического сезонного хода) для различных морей. Корреляции с коэффициентами 0,2 и выше – статистически значимы. Быстрее всего ослабевает автокорреляция аномалий ПМЛ в Чукотском море, где она становится незначимой уже на сдвиге в два месяца. Самое медленное уменьшение коэффициента автокорреляции отмечается для Баренцева моря, где значимая связь между ПМЛ прослеживается до сдвига в четыре месяца. Данная особенность отмечается и в работе [32], что может быть связано с влиянием притока атлантической воды на изменчивость ПМЛ в течение нескольких последовательных месяцев.

**Связь между площадью морских льдов в морях.** Для выявления связанных изменений ПМЛ проведён корреляционный анализ аномалий ПМЛ в исследуемых морях для марта, июня, сентября и декабря. Для исходных несглаженных рядов корреляции не превышают 0,6. Корреляции рядов с пятилетним скользящим осреднением значительно выше (табл. 2). Максимальные положительные корреляции (0,70–0,83) отмечаются для всех сезонов между ПМЛ в Баренцевом и Карском морях. Положительная связь в течение всего года прослеживается между ПМЛ в Восточно-Сибирском и Чукотском морях. Отрицательные значе-



**Рис. 3.** Годовой ход площади арктического льда ( $\text{км}^2$ ) в арктических морях (среднее за период 1981–2000 гг.) по данным архива HadISST1:

*a:* 1 – Баренцевом; 2 – Карском; 3 – Восточно-Сибирском; 4 – Охотском; 5 – Баффина; *б:* 1 – Лаптевых; 2 – Чукотском; 3 – Беринговом; 4 – Лабрадор; 5 – Гренландском

**Fig. 3.** The seasonal sea ice area ( $\text{km}^2$ ) in the Arctic seas (average for the period 1981–2000): *a:* 1 – Barents; 2 – Kara; 3 – East Siberian; 4 – Okhotsk; 5 – Baffin; *б:* 1 – Laptev; 2 – Chukchi; 3 – Bering; 4 – Labrador; 5 – Greenland

ния коэффициента корреляции, вне зависимости от сезона, наблюдаются между ПМЛ в море Лабрадор и Гренландском. Однако, кроме смежных морей, в некоторых из которых связь между ПМЛ ожидаема, обнаружены также значимые связи между ПМЛ и в отдалённых друг от друга морях: отрицательная связь зимой в Баренцевом море и

море Баффина, в Карском море и море Баффина; положительная корреляция между ПМЛ в Баренцевом и Охотском морях, Беринговом море и море Баффина в зимний сезон. Такая связь объясняется разнонаправленным влиянием Арктического колебания [33] на ПМЛ в обоих морях.

Однозначной зависимости силы корреляции от сезона не отмечается. Так, для Баренцева и Карского морей, Баренцева моря и моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского моря наиболее сильная связь ПМЛ отмечается в летний период, а для Баренцева и Гренландского, напротив, зимой. Для ряда морей знак корреляции между ПМЛ меняется при переходе от одного сезона к другому (например, Баренцево и Лабрадор, Карское и Баффина, Лаптева и Лабрадор).

**Корреляционный анализ между площадью льда в арктических морях и температурой воздуха на суше.** В регионе Баренцева моря отмечается изменчивость ПМЛ и в марте, и в сентябре (рис. 4, *a*). Это может быть обусловлено рядом факторов, важнейшие из которых – вариации притока тёплой атлантической воды в Баренцево море [34, 35]. Также влияет на изменчивость ПМЛ в Баренцевом море *Североатлантическое колебание* (САК) [17, 36, 37], как прямым путём – переносом тёплых воздушных масс, так и воздействуя на интенсивность притока атлантической воды в Баренцево море через его западную границу, причём связь САК с притоком нестационарна [7]. В свою очередь динамика площади морского льда также влияет на атмосферную циркуляцию (в частности, и на САК) в результате изменения меридионального градиента температуры [38].

Самое интенсивное сокращение ПМЛ в Баренцевом море (примерно на 80 тыс.  $\text{км}^2$ /десятилетие) отмечается в зимний период, в то время как ПМЛ во всей Арктике сильнее уменьшается в летний сезон. С 1953 по 2016 г. в Баренцевом море площадь морского льда в марте сократилась на 60%. В 1950–70-х годах не отмечалось полного открытия акватории моря ото льда в летний период, а в период с 1980-х годов до настоящего времени в некоторые годы наблюдаются нулевые значения ПМЛ. При этом разброс межгодовой изменчивости в годы минимума и максимума достигал 700 тыс.  $\text{км}^2$ . Летом эти значения гораздо ниже, что связано с практически полным отсутствием морских льдов. С 1980-х годов всё чаще наблюдаются периоды с пол-

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между сглаженным пятилетним скользящим средним площади морского льда (ПМЛ)\* в арктических морях для периода 1979–2017 гг. для марта, июня, сентября и декабря. Значимые (на 95%-м уровне) коэффициенты корреляции выделены жирным шрифтом

Море**	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Месяц
1	<b>0,70</b>	<b>0,50</b>	0,06	<b>0,32</b>	<b>0,66</b>	<b>-0,51</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,28</b>	<b>0,67</b>	III
	<b>0,71</b>	0,00	0,15	-0,19	<b>0,39</b>	<b>0,71</b>	-0,19	0,12	<b>0,47</b>	VI
	<b>0,83</b>	<b>0,54</b>	0,14	<b>0,24</b>	–	<b>-0,42</b>	<b>0,67</b>	<b>0,52</b>	-0,25	IX
	<b>0,35</b>	0,12	<b>0,49</b>	<b>0,52</b>	<b>0,32</b>	<b>0,25</b>	<b>-0,52</b>	-0,23	<b>0,44</b>	XII
2	<b>0,72</b>	<b>0,29</b>	<b>0,52</b>	0,12	<b>-0,72</b>	<b>-0,47</b>	-0,19	<b>0,29</b>		III
	-0,20	-0,18	-0,16	<b>0,61</b>	<b>0,68</b>	<b>-0,37</b>	<b>0,56</b>	0,13		VI
	<b>0,63</b>	-0,25	0,00	–	<b>-0,47</b>	<b>0,35</b>	<b>0,51</b>	<b>-0,41</b>		IX
	<b>0,73</b>	<b>0,63</b>	0,10	0,22	<b>-0,02</b>	<b>-0,25</b>	0,06	-0,22		XII
3	0,03	<b>0,25</b>	-0,06	<b>-0,36</b>	<b>-0,32</b>	<b>-0,42</b>	0,06			III
	<b>0,60</b>	0,19	0,05	-0,05	-0,14	-0,14	-0,01			VI
	0,12	0,18	–	<b>-0,31</b>	0,50	<b>0,49</b>	-0,12			IX
	<b>0,24</b>	<b>-0,32</b>	0,22	<b>-0,24</b>	<b>-0,33</b>	0,15	-0,07			XII
4	<b>0,49</b>	-0,01	<b>-0,60</b>	-0,06	<b>0,52</b>	<b>-0,27</b>				III
	<b>0,54</b>	-0,08	-0,23	0,11	-0,20	<b>0,58</b>				VI
	<b>0,68</b>	–	0,21	<b>0,53</b>	0,07	0,11				IX
	<b>0,61</b>	<b>0,24</b>	<b>0,37</b>	-0,10	0,06	-0,13				XII
5	0,10	<b>-0,54</b>	0,05	<b>0,49</b>	0,01					III
	<b>-0,44</b>	<b>-0,28</b>	<b>0,53</b>	0,02	<b>0,49</b>					VI
	–	<b>0,24</b>	<b>0,51</b>	<b>0,37</b>	0,08					IX
	0,15	<b>0,56</b>	0,19	<b>-0,38</b>	0,05					XII
6	-0,17	0,19	0,16	<b>0,49</b>						III
	<b>0,50</b>	<b>-0,66</b>	<b>0,49</b>	<b>-0,26</b>						VI
	–	–	–	–						IX
	-0,22	-0,13	<b>0,42</b>	<b>-0,43</b>						XII
7	<b>0,47</b>	-0,17	<b>-0,23</b>							III
	-0,20	<b>0,47</b>	-0,05							VI
	-0,15	<b>-0,27</b>	<b>0,49</b>							IX
	<b>0,24</b>	<b>-0,69</b>	0,15							XII
8	<b>0,64</b>	<b>-0,55</b>								III
	-0,14	<b>0,43</b>								VI
	<b>0,41</b>	0,14								IX
	<b>-0,26</b>	<b>-0,41</b>								XII
9	<b>-0,43</b>									III
	-0,21									VI
	<b>-0,44</b>									IX
	<b>-0,40</b>									XII

\*Из временного хода ПМЛ для каждого моря удалён климатический тренд.

\*\*Море: 1 – Баренцево, 2 – Карское, 3 – Лаптевых, 4 – Восточно-Сибирское, 5 – Чукотское, 6 – Охотское, 7 – Берингово, 8 – Баффина, 9 – Лабрадор, 10 – Гренландское

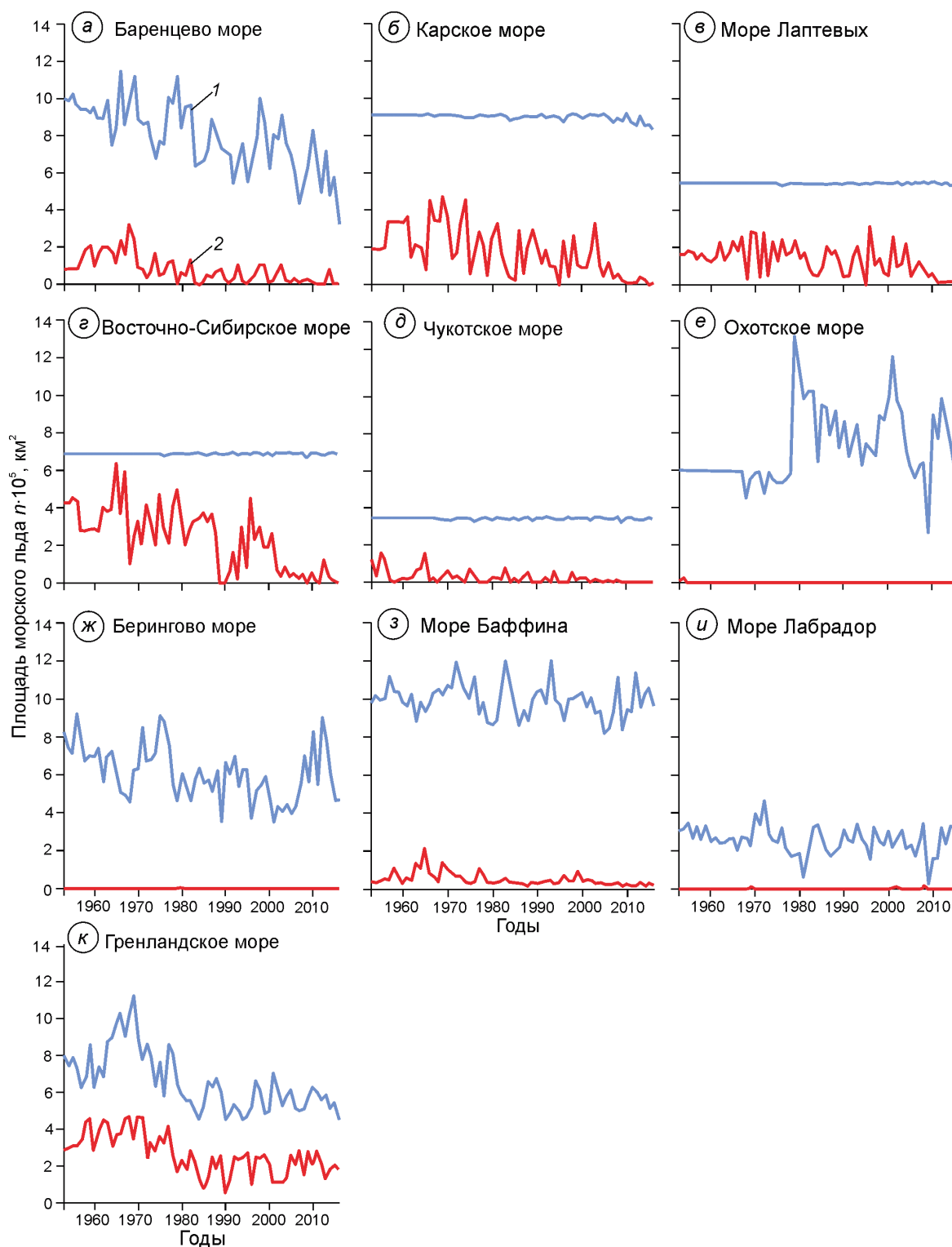
ностью свободным ото льда морем, а с 2005 г. режим полностью свободного ото льда моря стал практически постоянным.

Непосредственно на побережье Баренцева моря в марте статистически значимой связи аномалий температуры и льда не отмечается (только на Кольском п-ове) (рис. 5, а). Но наблюдается область значимых отрицательных корреляций на севере Западной Сибири – на побережье Карского моря и на п-ове Таймыр. Это может быть связано с тем, что изменения ПМЛ в Баренцевом и Карском морях сильно коррелирова-

ны (см. табл. 2). Наиболее сильные отрицательные корреляции (-0,62) отмечаются в районе арх. Земля Франца-Иосифа.

Положительные корреляции над Канадским арктическим архипелагом, востоком Канады, Чукоткой, западом Аляски, контрастирующие с отрицательными корреляциями над арктическим побережьем Сибири, объясняются влиянием Арктической осцилляции как на ПМЛ в Баренцевом море, так и на аномалии температуры [33]. Положительные связи достигают своего максимума в районе Баффиновой Земли.





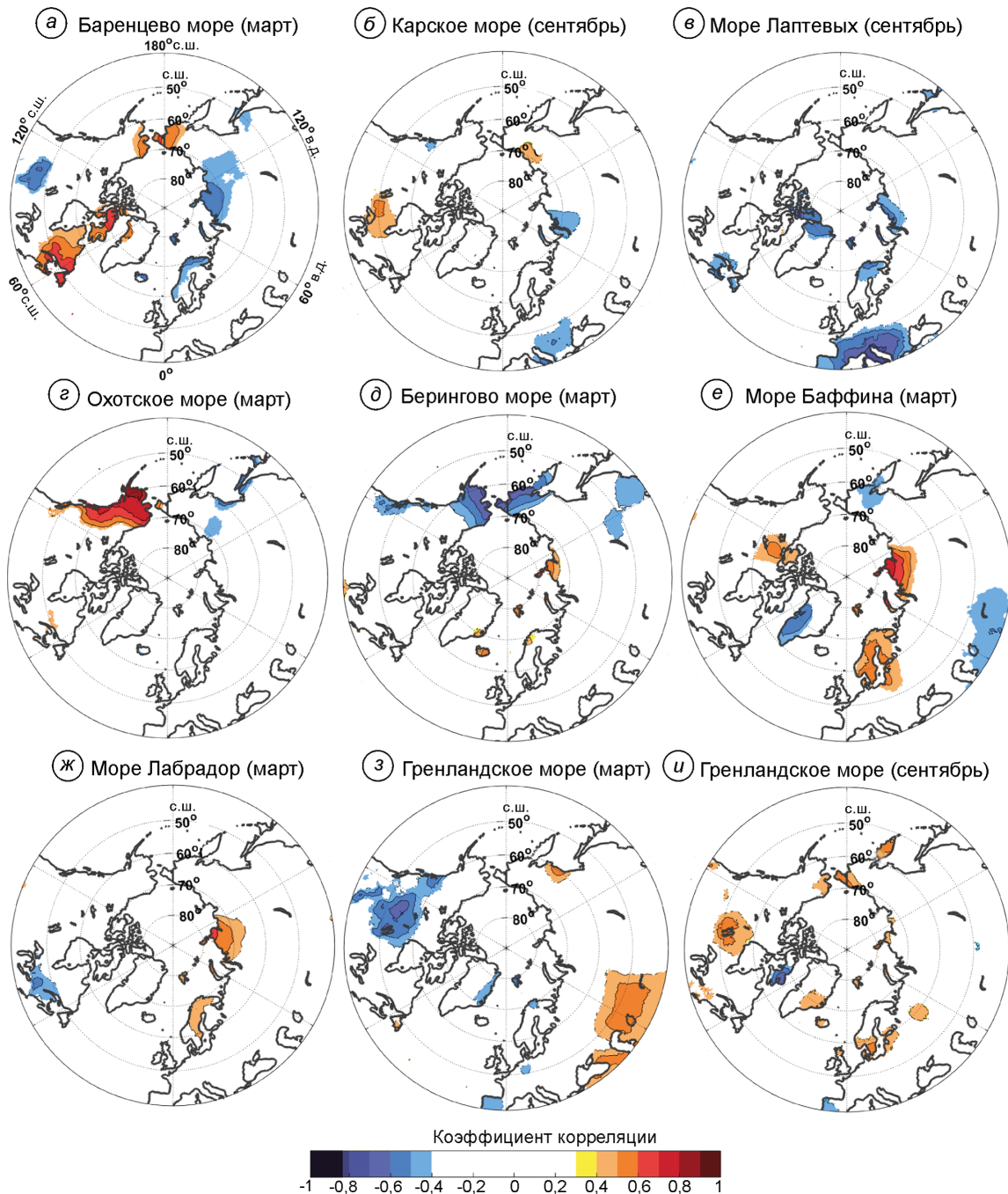
**Рис. 4.** Площадь морского льда ( $\text{км}^2$ ) по данным архива HadISST1 в период 1953–2016 гг. в марте (1) и сентябре (2) в арктических морях:

*a* – Баренцевом; *б* – Карском; *в* – Лаптевых; *г* – Восточно-Сибирском; *д* – Чукотском; *е* – Охотском; *ж* – Беринговом; *з* – Баффина; *и* – Лабрадор; *к* – Гренландском

**Fig. 4.** Sea ice area time series ( $\text{км}^2$ ) based HadISST1 dataset for 1953–2016 in March (1) and in September (2) in the Arctic seas:

*a* – Barents; *б* – Kara; *в* – Laptev; *г* – East Siberian; *д* – Chukchi; *е* – Okhotsk; *ж* – Bering; *з* – Baffin; *и* – Labrador; *к* – Greenland





**Рис. 5.** Коэффициенты корреляции между площадью морского льда в Баренцевом море в марте (а), в Карском море (б) и море Лаптевых (в) в сентябре, в Охотском (г), Беринговом (д), Баффина (е), Лабрадор (ж), Гренландском (з) морях в марте, Гренландском море в сентябре (и) и приповерхностной температурой в период 1953–2016 гг. (оба параметра сглажены пятилетним скользящим средним).

Области значимых корреляций (на 90%-м уровне) закрашены [коэффициенты, по модулю превышающие 0,42 (а), 0,4 (б), 0,41 (в), 0,48 (г), 0,42 (д), 0,45 (е), 0,42 (ж), 0,4 (з, и)]

**Fig. 5.** Correlation coefficients for correlations between sea ice area in the Barents Sea in March (a), in the Kara Sea (б) and Laptev Sea (в) in September, in Okhotsk Sea (г), Bering Sea (д), Baffin Sea (е), Labrador Sea (ж), Greenland Sea (з) in March, in the Greenland Sea in September (и), and land temperature (both parameters are smoothed 5 year running average) for 1953–2016.

Regions with significant (90% confidence level) correlations are shaded [(absolute value of correlation coefficients more than 0,42 (a), 0,4 (б), 0,41 (в), 0,48 (г), 0,42 (д), 0,45 (е), 0,42 (ж), 0,4 (з, и)]

Площадь морских льдов в *Карском море* в марте оставалась почти постоянной в течение исследуемого периода (см. рис. 4, б) с незначительным сокращением (на 5–7%) после 2010 г. Основная изменчивость ПМЛ отмечается в летний сезон, когда ПМЛ за период 1953–2016 гг. изменялась от 0,48 млн км<sup>2</sup> до полностью открытой ото льда акватории. На пике годового хода Карское море практически весь исследуемый период было полностью покрыто льдом. Регулярное появление лет с участками открытой воды зимой началось с начала XXI в. Летом наблюдаются сильная изменчивость (СКО 96 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет почти 2/3 средней площади льда в Карском море в сентябре) и значительный отрицательный тренд ПМЛ (–44 тыс. км<sup>2</sup>/10 лет). Как и для Баренцева моря, примерно после 2005 г. произошёл переход к преимущественно безлёдному режиму в сентябре. Поскольку наибольшая изменчивость ПМЛ проявляется в сентябре, была проанализирована связь этого параметра с температурой именно в этот месяц (см. рис. 5, б). Отрицательные корреляции отмечаются с архипелагами Новая Земля (наиболее сильные отрицательные корреляции достигают –0,54), Северная Земля, п-овом Ямал, западом Таймыра. Можно отметить дальнюю связь с ПТВ на Балканах. Положительные корреляции с температурой обнаружены в центральных частях Канады и на севере Восточной Сибири.

Площадь морских льдов в *море Лантевых*, как и в Карском море, в зимний период характеризуется слабой изменчивостью с почти полным покрытием акватории моря морскими льдами и значительными колебаниями в летний период (СКО 74 тыс. км<sup>2</sup> при площади моря 700 тыс. км<sup>2</sup>) с заметным сокращением ПМЛ в последние десятилетия (тренд –30 тыс. км<sup>2</sup>/10 лет) (см. рис. 4, в). Отрицательные корреляции с температурой отмечаются в сравнительно небольших регионах прибрежной арктической зоны: на Кольском п-ове и севере Скандинавии, Шпицбергене, Земле Франца-Иосифа, в северной части Новой Земли, Северной Земли, на п-ове Ямал и северо-западе Таймырского п-ова. Интересно, что самые сильные значимые отрицательные корреляции с температурой отмечаются в обширной области Западной и Южной Европы с максимальными по модулю значениями (–0,8) в Италии и на побережье Средиземного моря (см. рис. 5, в).

В зимний период *Восточно-Сибирское море* остаётся практически полностью покрытым морскими льдами (см. рис. 4, з). В летний сезон наблюдается сильная межгодовая и десятилетняя изменчивость ПМЛ с ярко выраженной тенденцией к уменьшению ПМЛ с середины 1960-х годов (тренд сокращения площади льда в сентябре и СКО – наибольшие среди рассматриваемых морей и составляют –93 тыс. км<sup>2</sup>/10 лет и 134,3 тыс. км<sup>2</sup> соответственно). Значимых связей с температурой почти не отмечается, только для сентября характерен небольшой участок значимых корреляций (не превышающих 0,5) над прилегающей к морю областью Якутии и над Чукоткой (не показан на рис. 4, з).

В *Чукотском море*, как и в большинстве морей в Восточном секторе Арктики, в зимние периоды 1953–2016 гг. практически вся акватория покрыта льдами (см. рис. 4, д). В сентябре в 1950–60-х годах выделяются два интенсивных декадных колебания ПМЛ, более чем в два раза превышающие последующие вариации, а затем изменчивость уменьшается и с 2000-х годов акватория моря становится свободной ото льда. Значимые области положительных корреляций отмечаются для сентября в Восточной Европе и в прибрежных районах Японского моря (не показано на рис. 4, д).

*Охотское море* – единственное из рассматриваемых в работе морей, изолированное от Арктического бассейна. Основная изменчивость наблюдается в зимний период с конца 1970-х годов по настоящее время (см. рис. 4, е). Резкое изменение ПМЛ в 1978–1979 гг. относится к артефакту и связано с появлением нового источника данных – спутникового зондирования. Увеличение ПМЛ в начале 2000-х годов подтверждается и материалами других исследований [39, 40]. В связи с этим корреляционный анализ проводился для периода 1979–2016 гг. для марта. В летний период акватория моря полностью свободна ото льда.

Области сильных положительных корреляций на Аляске и в западной части Канады с максимальными значениями, превышающими 0,8, с отрицательными корреляциями на северо-восточном побережье Охотского моря (см. рис. 5, з) указывают на связь изменчивости ПМЛ с интенсивностью Алеутской депрессии. Усиление депрессии одновременно приводит к адвекции тёплых воздушных масс с юга-запада на Аляску и притоку холодного арктического воздуха к Охотскому морю и росту ПМЛ. Связь изменчивости

площади морского льда в Охотском море с циркуляционной системой Алеутская депрессия – Сибирский антициклон исследуется в работе [41], в работе [42] отмечается и влияние САК.

*Берингово море* связывает Тихий океан и Арктический бассейн. Ход ПМЛ в зимний период обнаруживает декадную изменчивость (см. рис. 4, ж). В сентябре море остаётся свободным ото льда в течение всего исследуемого периода. В марте отмечается отрицательная связь ПМЛ с температурой полуостровов Чукотка, Камчатка, Аляска, северо-запада США, а также юга Дальнего Востока и северо-востока Китая, наиболее сильные отрицательные корреляции – с Алеутскими островами ( $-0,81$ ) (см. рис. 5, д). Положительные корреляции наблюдаются с севером Таймыра и с архипелагами Северная Земля, Новая Земля, Земля Франца-Иосифа, Шпицберген и о. Исландия. Сильная десятилетняя и междесятилетняя изменчивость ПМЛ в Беринговом море зимой связана с изменениями температуры поверхности в Тихом океане. Значимая отрицательная корреляция (коэффициент корреляции  $-0,6$ ) отмечается между индексом Тихоокеанской декадной осцилляции и ПМЛ в Беринговом море в марте. Поэтому для ПМЛ в марте отсутствует долгопериодная тенденция к уменьшению в последние десятилетия. Взаимосвязь изменений температуры поверхности северной части Тихого океана и характеристик ледовых условий в Беринговом море показана в работе [43].

*Море Баффина* связано с Арктическим бассейном множеством проливов. Морской лёд наблюдается в море Баффина в течение всего года (см. рис. 4, з). Наибольшая изменчивость отмечается в марте, однако явной тенденции к сокращению ПМЛ не установлено. В сентябре межгодовые и десятилетние изменения ПМЛ наблюдаются до 1980-х годов, затем изменчивость ПМЛ практически отсутствует. Проанализированы связи ПМЛ с температурой воздуха в марте, когда отмечается значительная изменчивость ПМЛ (СКО  $91,1$  тыс. км<sup>2</sup>) при отсутствии долгопериодных трендов. Распределение областей значимых корреляций очень похоже на аналогичную карту для Баренцева моря (см. рис. 5, а), но с обратным знаком, что объясняется значительным противоположным влиянием САК на эти моря: усиление САК связано с усилением западного переноса в атлантическом секторе, уменьшением ПМЛ в Ба-

ренцевом море и с выносом арктического воздуха над морем Баффина. Изменчивость в Баренцевом море и море Баффина показывает значимые отрицательные корреляции в зимний период (см. табл. 2). В марте отрицательные связи отмечаются с западными и юго-западными районами Гренландии (до  $-0,6$ ), с севером п-ова Камчатка и югом п-ова Чукотка (см. рис. 5, е). Положительные связи наблюдаются со Скандинавией, севером Таймыра и Канады.

В *море Лабрадор* наблюдается значительная изменчивость ПМЛ в зимний период (СКО  $68,6$  тыс. км<sup>2</sup>), при этом не отмечается явно выраженного тренда (см. рис. 4, и). Максимум ПМЛ в начале 1970-х годов связан с Великой солёностной аномалией – сильным распреснением поверхностных вод Северной Атлантики [44]. Солёностные аномалии 1980-х и 1990-х годов, наряду с САК и явлением Эль-Ниньо/Южное колебание, также влияли на сильные межгодовые вариации ПМЛ [45]. В сентябре почти во все годы акватория моря была свободна ото льда. Картина связей ПМЛ в море Лабрадор в марте с температурой воздуха на суше (см. рис. 5, ж) схожа с зонами значимых корреляций ПМЛ в море Баффина на территории Евразии (см. рис. 5, е), однако в случае моря Лабрадор не прослеживается корреляций с полуостровами Камчатка и Чукотка. Отрицательные связи наблюдаются с юго-восточными районами Канады, наиболее сильные отрицательные корреляции ( $-0,56$ ) прослеживаются с восточной частью п-ова Лабрадор. Отметим общую особенность во временном ходе ПМЛ морей канадской части Арктики (см. рис. 4, з, и) – изменчивость ПМЛ не обнаруживает тренда к сокращению ПМЛ.

В *Гренландском море* изменения ПМЛ имеют схожую динамику в марте и сентябре (см. рис. 4, к). Коэффициент корреляции между ними составляет  $0,67$ . Период повышенных значений ПМЛ отмечается в 1960-е годы, более низких значений – с 1980-х годов по настоящее время. Установлено также, что полностью свободным ото льда море не становится даже в сентябре. В Гренландском море количество льда определяется выносом льда Трансарктическим течением вдоль восточного побережья Гренландии. На изменчивость интенсивности выноса льда сильно влияет САК [46]. Вынос льда, составляющий в год примерно  $1$  млн км<sup>2</sup>, по-видимому, огра-

ничивает с 1990-х годов дальнейшее сокращение ПМЛ, начавшееся с 1970-х годов.

В марте отрицательные связи ПМЛ с температурой воздуха отмечаются с восточным побережьем Гренландии (до  $-0,65$ ), центральными и западными районами Канады, положительные связи — с побережьем Охотского моря (см. рис. 5, з). В сентябре отрицательная корреляция ПМЛ с температурой воздуха (см. рис. 5, и) наблюдается с Баффиновой Землёй (с минимальными значениями  $-0,66$ ). Положительные корреляции охватывают значительно бóльшую площадь: это восточная часть Гренландии, запад Скандинавии, Прибалтика, центральные районы Канады, Камчатка, восток Чукотки и запад Аляски.

**Корреляции со сдвигом между площадью морских льдов и температурой воздуха.** Также были проанализированы связи с временными сдвигами между ПМЛ в морях и температурой воздуха. Рассматривались связи ПМЛ в Баренцевом море в марте с температурой в январе, феврале, марте (синхронная корреляция) и апреле. Установлено, что наибольшие области значимых корреляций отмечаются между температурой в январе и льдом в марте. Значимые связи практически пропадают между температурой в апреле и льдом в марте. Обнаруживается и быстрое убывание абсолютного значения коэффициента корреляции в случае связи хода температуры в апреле с ПМЛ в марте. Запаздывание изменений ПМЛ относительно температуры воздуха указывает на роль океанического притока тепла в формировании аномалий ПМЛ [30, 34, 35]. Аномалии притока формируются главным образом аномалиями атмосферной циркуляции и с задержкой в несколько месяцев влияют на ПМЛ.

### Заключение и выводы

Самое сильное сокращение площади морских льдов наблюдается в Баренцевом море в зимний период и в Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях в летний (вплоть до перехода к безлёдному режиму в начале XXI в.). В то же время в остальных арктических морях на фоне значительной десятилетней и междесятилетней изменчивости ПМЛ значимого тренда к уменьшению площади льда в последние десятилетия не отмечается. Выполненный автокорреляци-

онный анализ рядов среднемесячных аномалий отклонений ПМЛ от среднеклиматического сезонного хода показал, что коэффициент корреляции становится незначимым (менее 0,2) уже на сдвигах в три и более месяца, что подтверждается и другими работами [30, 31]. В Чукотском море аномалии ПМЛ не коррелированы уже при сдвиге в два месяца. Самое медленное убывание коэффициента автокорреляции отмечается в Баренцевом море, где значимая связь между ПМЛ прослеживается до сдвига в четыре месяца

Анализ связи изменчивости приповерхностной температуры воздуха на суше и площади морского льда в арктических морях показал наличие ожидаемой значимой отрицательной корреляции вблизи морей. Однако установлена связь с удалёнными от моря областями, в том числе с районами, находящимися существенно южнее арктических морей (связь аномалий ПМЛ в море Лаптевых в летний период с изменчивостью температуры в Западной и Южной Европе). Такая связь обусловлена главным образом влиянием атмосферной циркуляции, Североатлантического колебания, Тихоокеанской декадной осцилляции. Статистически значимые корреляции отмечаются лишь в ограниченных регионах. Максимальные абсолютные значения коэффициента корреляции достигают 0,6–0,7 (для исходных рядов) и 0,83 (для рядов, сглаженных пятилетним скользящим средним), в том числе и в удалённых от моря областях.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 18-05-60216, 17-29-05098) с использованием результатов, полученных в рамках Программы Президиума РАН «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования». Оценки причинно-следственных связей климатических процессов проводились в рамках Госзадания (тема № 0148-2019-0009).

**Acknowledgments.** This study was supported by Russian Foundation for Basic Research (grant № 18-05-60216, 17-29-05098) using results obtained under Program of the Presidium of Russian Academy of Sciences «Climate change: causes, risks, consequences, problems of adaptation and regulation». Estimation of causal relationship climatic processes were carried out according to State target (№ 0148-2019-0009).

## Литература

## References

1. Захаров В.Ф. Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 213 с.
2. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Смоляницкий В.М., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В. Эволюция площади морского ледового покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 5–19.
3. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследование Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50.
4. Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G., Woodgate R.A., Aagaard K., Lammers R.B., Steele M., Moritz R., Meredith M., Lee C.M. The large-scale freshwater cycle of the Arctic // *Journ. of Geophys. Research. Oceans*. 2006. V. 111. P. C11010.
5. Семенов В.А., Мартин Т., Беренс Л.К., Латиф М., Астафьева Е.С. Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей СМIP3 и СМIP5 // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107.
6. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 149–160.
7. Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V.S., Olsen A., Omar A.M., Otterå O.H., Risebrobakken B., Sandø A.B., Semenov V.A., Sorokina S.A. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system // *Reviews of Geophysics*. 2013. V. 51. № 3. P. 415–449.
8. Alexeev V.A., Walsh J.E., Ivanov V.V., Semenov V.A., Smirnov A.V. Warming in the Nordic Seas, North Atlantic storms and thinning Arctic sea ice // *Environmental Research Letters*. 2017. V. 12. № 8. P. 084011.
9. Семенов В.А. Связь аномально холодных зимних режимов на территории России с уменьшением площади морских льдов в Баренцевом море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 3. С. 257–266.
10. Kinnard C., Zdanowicz C.M., Fisher D.A., Isaksson E., de Vernal A., Thompson L.G. Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years // *Nature*. 2011. V. 479. № 7374. P. 509–513.
11. Olonscheck D., Mauritsen T., Notz D. Arctic sea-ice variability is primarily driven by atmospheric temperature fluctuations // *Nature Geoscience*. 2019. V. 12. № 6. P. 430.
12. Alexeev V.A., Esau I., Polyakov I.V., Byam S.J., Sorokina S. Vertical structure of recent Arctic warming from observed data and reanalysis products // *Climatic Change*. 2012. V. 111. № 2. P. 215–239.
13. Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming // *Journ. of Climate*. 2010. V. 23. № 14. P. 3888–3906.
14. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Климатические изменения в Арктике и северной полярной области // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 1 (84). С. 67–80.
15. Semenov V.A., Latif M. The early twentieth century warming and winter Arctic sea ice // *The Cryosphere*. 2012. V. 6. № 6. P. 1231–1237.
1. Zakharov V.F. *Morskiye l'dy v klimaticheskoy sisteme*. Sea ice in the climate system. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1996. 213 p. [In Russian].
2. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov N.E., Smolyanitsky V.M., Kharlanenkova N.E., Yulin A.V. The evolution of the Arctic sea ice area in the context of current climate change. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. Earth Research from Space. 2015, 2: 5–19. [In Russian].
3. Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V. Arctic ice cover becomes seasonal? *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. Earth Research from Space. 2013, 4: 50 [In Russian].
4. Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G., Woodgate R.A., Aagaard K., Lammers R.B., Steele M., Moritz R., Meredith M., Lee C.M. The large-scale freshwater cycle of the Arctic. *Journ. of Geophys. Research: Oceans*. 2006, 111: C11010.
5. Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K., Latif M., Astafyeva E.S. Arctic sea ice area changes in CMIP3 and CMIP5 climate models' ensembles. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (1): 77–107. [In Russian].
6. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolyanitsky V.M. Climatic changes of ice conditions in the Arctic seas of the Eurasian shelf. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2007, 75: 149–160. [In Russian].
7. Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V.S., Olsen A., Omar A.M., Otterå O.H., Risebrobakken B., Sandø A.B., Semenov V.A., Sorokina S.A. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophysics*. 2013, 51 (3): 415–449.
8. Alexeev V.A., Walsh J. E., Ivanov V.V., Semenov V.A., Smirnov A.V. Warming in the Nordic Seas, North Atlantic storms and thinning Arctic sea ice. *Environmental Research Letters*. 2017, 12 (8): 084011.
9. Semenov V.A. Link Between Anomalously Cold Winters in Russia and Sea-Ice Decline in the Barents Sea. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. *Izvestiya RAS. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016, 52 (3): 257–266. [In Russian].
10. Kinnard C., Zdanowicz C.M., Fisher D.A., Isaksson E., de Vernal A., Thompson L.G. Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years. *Nature*. 2011, 479 (7374): 509–513.
11. Olonscheck D., Mauritsen T., Notz D. Arctic sea-ice variability is primarily driven by atmospheric temperature fluctuations. *Nature Geoscience*. 2019, 12 (6): 430.
12. Alexeev V.A., Esau I., Polyakov I.V., Byam S.J., Sorokina S. Vertical structure of recent Arctic warming from observed data and reanalysis products. *Climatic Change*. 2012, 111 (2): 215–239.
13. Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming. *Journ. of Climate*. 2010, 23 (14): 3888–3906.
14. Alekseev G.V., Radionov V.F., Aleksandrov E.I., Ivanov N.E., Kharlanenkova N.E. Climate change in the Arctic and the northern polar region. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2010, 1 (84): 67–80. [In Russian].
15. Semenov V.A., Latif M. The early twentieth century warming and winter Arctic sea ice. *The Cryosphere*. 2012, 6 (6): 1231–1237.

16. Бокучава Д.Д., Семенов В.А. Анализ аномалий приземной температуры воздуха в Северном полушарии в течение XX века по данным наблюдений и реанализов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. № 1. С. 28–51.
17. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V. Long-term ice variability in Arctic marginal seas // *Journ. of Climate*. 2003. V. 16. № 12. P. 2078–2085.
18. Гудкович З.М., Ковалев Е.Г. О некоторых механизмах циклических изменений климата в Арктике и Антарктике // *Океанология*. 2002. Т. 42. № 6. С. 1–7.
19. Фролов И. Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010. № 2. С. 52–61.
20. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Вклад радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мультидесятилетней осцилляции в тренды приповерхностной температуры // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 9. С. 5–14.
21. Walsh J.E., Chapman W.L. 20th-century sea-ice variations from observational data // *Annals of Glaciology*. 2001. V. 33. P. 444–448.
22. Walsh J.E., Fetterer F., Scott Stewart J., Chapman W.L. A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850 // *Geographical Review*. 2017. V. 107. № 1. P. 89–107.
23. Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *Journ. of Geophys. Research. Atmospheres*. 2003. V. 108. № D14. P. 4407.
24. Meier W.N., Hovelsrud G.K. van Oort B.E.H., Key J.R., Kovacs K.M., Michel C., Haas C., Granskog M.A., Gerland S., Perovich D.K., Makshtas A., Reist J.D. Arctic sea ice in transformation: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity // *Review of Geophysics*. 2014. V. 52. P. 185–217.
25. Ivanova N., Johannessen O.M., Pedersen L.T., Tonboe R.T. Retrieval of Arctic sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: A comparison of eleven sea ice concentration algorithms // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2014. V. 52. № 11. P. 7233–7246.
26. Alekseev G., Glok N., Smirnov A. On assessment of the relationship between changes of sea ice extent and climate in the Arctic // *Intern. Journ. of Climatology*. 2016. V. 36. № 9. P. 3407–3412.
27. Connolly R., Connolly M., Soon W. Re-calibration of Arctic sea ice extent datasets using Arctic surface air temperature records // *Hydrological Sciences Journ.* 2017. V. 62. № 8. P. 1317–1340.
28. Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Семенов В.А. Региональные особенности изменения зимних экстремальных температур и осадков на территории России в 1970–2015 гг. // *Лёд и Снег*. 2018. Т. 58. № 4. С. 486–497.
29. Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset // *Intern. Journ. of Climatology*. 2014. V. 34. № 3. P. 623–642.
30. Lemke P., Trinkl E.W., Hasselmann K. Stochastic dynamic analysis of polar sea ice variability // *Journ. of Physical Oceanography*. 1980. V. 10. № 12. P. 2100–2120.
16. Bokuchava D.D., Semenov V.A. Analysis of surface air temperature anomalies in the Northern hemisphere in the 20th century using observational and reanalysis data. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. 2018, 1: 28–51. [In Russian].
17. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V. Long-term ice variability in Arctic marginal seas. *Journ. of Climate*. 2003, 16 (12): 2078–2085.
18. Gudkovich Z.M., Kovalev E.G. About some mechanisms of cyclical climate changes in the Arctic and Antarctic. *Okeanologiya*. 2002, 42 (6): 1–7. [In Russian].
19. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanitsky V.M. Climate change in the Arctic and Antarctic – the result of natural causes. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2010, 2: 52–61. [In Russian].
20. Mokhov I.I., Smirnov D.A. Contribution of Greenhouse Gas Radiative Forcing and Atlantic Multi-decadal Oscillation to Surface Air Temperature Trends. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2018, 9: 5–14. [In Russian].
21. Walsh J.E., Chapman W.L. 20th-century sea-ice variations from observational data. *Annals of Glaciology*. 2001, 33: 444–448.
22. Walsh J.E., Fetterer F., Scott Stewart J., Chapman W.L. A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850. *Geographical Review*. 2017, 107 (1): 89–107.
23. Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journ. of Geophys. Research. Atmospheres*. 2003, 108 (D14): 4407.
24. Meier W.N., Hovelsrud G.K. van Oort B.E.H., Key J.R., Kovacs K.M., Michel C., Haas C., Granskog M.A., Gerland S., Perovich D.K., Makshtas A., Reist J.D. Arctic sea ice in transformation: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity. *Review of Geophysics*. 2014, 52: 185–217.
25. Ivanova N., Johannessen O.M., Pedersen L.T., Tonboe R.T. Retrieval of Arctic sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: A comparison of eleven sea ice concentration algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2014, 52 (11): 7233–7246.
26. Alekseev G., Glok N., Smirnov A. On assessment of the relationship between changes of sea ice extent and climate in the Arctic. *Intern. Journ. of Climatology*. 2016, 36 (9): 3407–3412.
27. Connolly R., Connolly M., Soon W. Re-calibration of Arctic sea ice extent datasets using Arctic surface air temperature records. *Hydrological Sciences Journ.* 2017, 62 (8): 1317–1340.
28. Titkova T.B., Cherenkova Ye.A., Semenov V.A. Regional features of changes in winter extreme temperatures and precipitation in Russia in 1970–2015. *Led i Sneg*. 2018, 58 (4): 486–497. [In Russian].
29. Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. *Intern. Journ. of Climatology*. 2014, 34 (3): 623–642.
30. Lemke P., Trinkl E.W., Hasselmann K. Stochastic dynamic analysis of polar sea ice variability. *Journ. of Physical Oceanography*. 1980, 10 (12): 2100–2120.



31. Stroeve J., Hamilton L. C., Bitz C.M., Blanchard-Wrigglesworth E. Predicting September sea ice: Ensemble skill of the SEARCH sea ice outlook 2008–2013 // *Geophys. Research Letters*. 2014. V. 41. № 7. P. 2411–2418.
32. Onarheim I.H., Eldevik T., Årthun M., Ingvaldsen R.B., Smedsrud L.H. Skillful prediction of Barents Sea ice cover // *Geophys. Research Letters*. 2015. V. 42. № 13. P. 5364–5371.
33. Thompson D., Wallace J.M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // *Geophys. Research Letters*. 1998. V. 25. № 9. P. 1297–1300.
34. Schlichtholz P. Influence of oceanic heat variability on sea ice anomalies in the Nordic Seas // *Geophys. Research Letters*. 2011. V. 38. P. L05705.
35. Семенов В.А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // *ДАН*. 2008. Т. 418. № 1. С. 106–109.
36. Dickson R. R., Osborn T.J., Hurrell J.W., Meincke J., Blindheim J., Adlandsvik B., Vinje T., Alekseev G., Maslowski W. The Arctic Ocean response to the North Atlantic oscillation // *Journ. of Climate*. 2000. V. 13. № 15. P. 2671–2696.
37. Sorteberg A., Kvingedal B. Atmospheric forcing on the Barents Sea winter ice extent // *Journ. of Climate*. 2006. V. 19. № 19. P. 4772–4784.
38. Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 4. С. 403–421.
39. Ohshima K. I., Nihashi S., Hashiya E., Watanabe T. Interannual variability of sea ice area in the Sea of Okhotsk: Importance of surface heat flux in fall // *Journ. of Meteorol. Soc. Japan*. 2006. V. 84. P. 907–919.
40. Пищальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г // *Изв. ТИНРО*. 2016. Т. 185. С. 228–239.
41. Linkin M.E., Nigam S. The North Pacific Oscillation–west Pacific teleconnection pattern: Mature-phase structure and winter impacts. // *Journ. of Climate*. 2008. V. 21. P. 1979–1997.
42. Ogi M., Tachibana Y., Yamazaki K. The connectivity of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) and the summer Okhotsk high // *Journ. of Meteorol. Soc. Japan*. 2004. V. 82. P. 905–913.
43. Zhang J., Woodgate R., Moritz R. Sea ice response to atmospheric and oceanic forcing in the Bering Sea // *Journ. of Physical Oceanography*. 2010. V. 40. № 8. P. 1729–1747.
44. Dickson R.R., Meincke J., Malmberg S.-A., Lee A.J. The «Great Salinity Anomaly» in the northern North Atlantic, 1968–1982 // *Progress in Oceanography*. 1988. V. 20. № 2. P. 103–151.
45. Belkin I. M., Levitus S., Antonov J., Malmberg S.A. «Great salinity anomalies» in the North Atlantic // *Progress in Oceanography*. 1998. V. 41. № 1. P. 1–68.
46. Kwok R., Rothrock D.A. Variability of Fram Strait ice flux and North Atlantic oscillation // *Journ. of Geophys. Research: Oceans*. 1999. V. 104. № C3. P. 5177–5189.
31. Stroeve J., Hamilton L. C., Bitz C. M., Blanchard-Wrigglesworth E. Predicting September sea ice: Ensemble skill of the SEARCH sea ice outlook 2008–2013. *Geophys. Research Letters*. 2014, 41 (7): 2411–2418.
32. Onarheim I.H., Eldevik T., Årthun M., Ingvaldsen R.B., Smedsrud L.H. Skillful prediction of Barents Sea ice cover. *Geophys. Research Letters*. 2015, 42 (13): 5364–5371.
33. Thompson D., Wallace J.M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Research Letters*. 1998, 25 (9): 1297–1300.
34. Schlichtholz P. Influence of oceanic heat variability on sea ice anomalies in the Nordic Seas. *Geophys. Research Letters*. 2011, 38: L05705.
35. Semenov V.A. Influence of oceanic inflow to the Barents Sea on climate variability in the Arctic region. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2008, 418 (1): 106–109. [In Russian].
36. Dickson R. R., Osborn T.J., Hurrell J.W., Meincke J., Blindheim J., Adlandsvik B., Vinje T., Alekseev G., Maslowski W. The Arctic ocean response to the North Atlantic oscillation. *Journ. of Climate*. 2000, 13 (15): 2671–2696.
37. Sorteberg A., Kvingedal B. Atmospheric forcing on the Barents Sea winter ice extent. *Journ. of Climate*. 2006, 19 (19): 4772–4784.
38. Semenov V. A., Mokhov I. I., Latif M. Influence of the ocean surface temperature and sea ice concentration on regional climate changes in Eurasia in recent decades. *Izvestiya RAN. Phisika atmosfery i okeana*. *Izvestiya RAS. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012, 48 (4): 403–421. [In Russian].
39. Ohshima K. I., Nihashi S., Hashiya E., Watanabe T. Interannual variability of sea ice area in the Sea of Okhotsk: Importance of surface heat flux in fall. *Journ. of Meteorol. Soc. Japan*. 2006, 84: 907–919.
40. Pishchalnik V.M. Romanyuk V.A., Minervin I.G., Batukhtina A.S. Analysis of the dynamics of the ice cover anomalies of the Sea of Okhotsk in the period from 1882 to 2015. *Izvestiya TINRO*. Bulletin of TINRO. 2016, 185: 228–239. [In Russian].
41. Linkin M.E., Nigam S. The North Pacific Oscillation–west Pacific teleconnection pattern: Mature-phase structure and winter impacts. *Journ. of Climate*. 2008, 21: 1979–1997.
42. Ogi M., Tachibana Y., Yamazaki K. The connectivity of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) and the summer Okhotsk high. *Journ. of Meteorol. Soc. Japan*. 2004, 82: 905–913.
43. Zhang J., Woodgate R., Moritz R. Sea ice response to atmospheric and oceanic forcing in the Bering Sea. *Journ. of Physical Oceanography*. 2010, 40 (8): 1729–1747.
44. Dickson R.R., Meincke J., Malmberg S.-A., Lee A.J. The «Great Salinity Anomaly» in the northern North Atlantic, 1968–1982. *Progress in Oceanography*. 1988, 20 (2): 103–151.
45. Belkin I. M., Levitus S., Antonov J., Malmberg S.A. «Great salinity anomalies» in the North Atlantic. *Progress in Oceanography*. 1998, 41 (1): 1–68.
46. Kwok R., Rothrock D.A. Variability of Fram Strait ice flux and North Atlantic oscillation. *Journ. of Geophys. Research: Oceans*. 1999, 104 (C3): 5177–5189.