

УДК 551.583,551.467

ИЗМЕНЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ МОРСКИХ ЛЬДОВ В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА: ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ НА ОСНОВЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

© 2020 г. В. А. Семенов^{a, b, *}, Т. А. Матвеева^b

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^bИнститут географии РАН, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4, Москва, 119017 Россия

*E-mail: vasetenov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 07.05.2020 г.

После доработки 14.05.2020 г.

Принята к публикации 03.06.2020 г.

Глобальное потепление в последние десятилетия сопровождается быстрым, на 11%/10 лет в летний период, сокращением площади арктических морских льдов. Для понимания причин таких изменений необходимо представлять масштаб долгопериодных колебаний площади льдов в период, предшествующий значительному росту антропогенных выбросов парниковых газов в атмосфере. Современные эмпирические данные о пространственно-временной динамике морских льдов в Арктике в период до 1950-х гг. характеризуются значительными пропусками. В данной работе выполнена реконструкция среднемесячных полей концентрации морских льдов (КМЛ) в первой половине XX века с использованием связи пространственно-временных структур изменчивости КМЛ с приземной температурой над сушей Северного полушария. Реконструированные данные показывают наличие значительной (около 1.5 млн км² в сентябре и 0.7 млн км² в марте) отрицательной аномалии площади морских льдов в Арктике в середине XX века, что существенно больше, чем аномалия в этот период по существующим в настоящее время сеточным архивам КМЛ.

Ключевые слова: Арктические морские льды, потепление середины XX века, климат Арктики

DOI: 10.31857/S0002351520050107

ВВЕДЕНИЕ

Сокращение площади Арктических морских льдов (ПАМЛ) в последние десятилетия является, пожалуй, самым ярким и наиболее точно наблюдаемым проявлением современных изменений климата Земли. Непрерывное спутниковое зондирование с 1978 г. позволяет восстановить концентрацию (сплоченность) морских льдов, используя измерения микроволнового излучения [1]. Согласно этим данным, ПАМЛ за последние 40 лет наблюдений сократилась в сентябре, месяц сезонного минимума ПАМЛ, на 2.57 млн км², что составляет 41%. Зимой сокращение происходит значительно медленнее и для марта, сезонного максимума ПАМЛ, составляет 0.69 млн км² (4.8%). Вместе с тем, зимой сокращение площади морских льдов происходит главным образом в Баренцевом и Охотском морях, где только за последние 20 лет она сократилась на 34 и 14% соответственно [2]. Такие изменения приводят к значительному увеличению потоков тепла в атмосферу и перестройке региональной и крупномасштабной

атмосферной циркуляции, в частности, вызывая погодные аномалии на территории России [2]. Современное сокращение ПАМЛ, по данным палеореконовструкций является беспрецедентным за последнюю тысячу лет [3].

До эпохи регулярных спутниковых наблюдений мониторинг ПАМЛ проводился с помощью береговых, судовых, самолетных наблюдений, дрейфующих буев. Такие наблюдения позволили создать сеточный архив данных по концентрации морских льдов (КМЛ) в Арктике с 1953 г. [4]. Эти данные, дополненные впоследствии спутниковыми данными, являются основой всех современных сеточных архивов КМЛ, используемых для анализа изменений климата, в том числе в отчетах Межправительственной группы экспертов по изменению климата, сравнения с результатами климатических моделей и как граничные условия в атмосферных реанализах и моделях общей циркуляции атмосферы (МОЦА) (данные Центра Гадлея, Великобритания, HadISST, различных версий [6]).

До 1953 г. сведения о КМЛ в Арктике носят ограниченный (по пространству, времени года, многолетнему периоду наблюдений) характер, неоднородны (по используемым методам наблюдений и анализа) и не могут дать полной картины об изменениях как общей площади морских льдов в Арктике, так и региональных вариаций. Вследствие этого изменения ПАМЛ с начала XX века до 1950-х гг. в сеточных архивах характеризуются относительно небольшой амплитудой и отсутствием значительных долгопериодных колебаний, сравнимых с современными. В некоторые периоды, например, во время Второй мировой войны, данные просто заменены климатологическими значениями [6]. Такая динамика ПАМЛ в первой половине XX в. не согласуется с сильным потеплением в Арктике в этот период, сравнимым по своим темпам с современным потеплением [7]. На значительное уменьшение площади льдов в летний период в середине XX в. указывают региональные данные в морях российской Арктики [8]. Существенные долгопериодные квазипериодические колебания ПАМЛ прослеживаются и в региональных индексах ледовитости в морях атлантического сектора Арктики, а также в данных палеореконов за последние 400 лет, свидетельствуя о связи этих колебаний с Атлантической мультideкадной осцилляцией, АМО [9]. Между тем, положительная фаза АМО в середине XX в. по данным [6] не сопровождалась уменьшением ПАМЛ ни в зимний, ни в летний период. Численные эксперименты с МОЦА с использованием данных [6] показали, что при отсутствии значительной (порядка 1 млн км²) отрицательной аномалии ПАМЛ в середине XX в. модель не способна воспроизвести аномалии приповерхностной температуры в Арктике в зимний период, при этом практически идеально воспроизводя изменения температуры начиная со второй половины XX в. [10].

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАМЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

Связь между приповерхностной температурой воздуха (ПТВ) и КМЛ [2] и наличие продолжительных стационарных температурных наблюдений на суше в арктической зоне позволяют использовать ПТВ для восстановления данных по ПАМЛ в период отсутствия достаточного количества прямых наблюдений. Стационарные данные, ввиду значительного радиуса пространственной корреляции температурных аномалий, позволяют создать сеточные архивы температурных аномалий над сушей Северного полушария, по продолжительности охватывающие весь XX в., которые также могут быть использованы для реконструкций [11]. Такой подход был в последние годы использован для реконструкции изменений сезон-

ной и среднегодовой площади морских льдов для всей Арктики или ее отдельных секторов [12, 13]. Полученные в результате таких реконструкций оценки отрицательной аномалии ПАМЛ в середине XX в. существенно превышают по амплитуде значения в данных [6].

Вместе с тем, такие оценки не предоставляют информацию о пространственной структуре изменений КМЛ, что не позволяет использовать такие данные как граничные условия для МОЦА или для региональных исследований. Важно, что линейная связь, полученная между двумя относительно короткими (менее 40 лет) рядами данных с сильным климатическим трендом в присутствии значимых мультideкадных колебаний (с характерным периодом 60–70 лет) и межгодовой изменчивости, предположительно совершенно разной природы (парникового эффекта, АМО и естественных вариаций атмосферной и океанической циркуляции), и, соответственно, с различной пространственной структурой, может приводить к неверным оценкам долгопериодных колебаний ПАМЛ в реконструируемый период. Помимо этого, связь КМЛ в арктических морях с ПТВ может быть удаленной с максимальными корреляциями над сушей в средних широтах и даже в субтропиках [2].

Недавно был опубликован еще один сеточный архив среднемесячных данных по КМЛ SIB1850, восполняющий пропуски в период до эпохи спутниковых наблюдений с помощью синтеза различных региональных данных и использования метода аналогов [14]. Данные SIB1850 указывают на значительную отрицательную аномалию ПАМЛ в середине XX в. Следует отметить, что, возможно, ввиду неоднородности используемых данных и методов их синтеза, данные SIB1850 пока широко не используются в исследованиях.

Другим подходом к использованию связи ПТВ-КМЛ для реконструкции ПАМЛ в прошлом является разложение пространственно-временных массивов данных по КМЛ и ПТВ на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). Первая ЭОФ представляет собой пространственную структуру, объясняющую максимальную временную изменчивость исходного массива данных. Вторая ЭОФ описывает максимальную изменчивость остатка после вычета изменчивости, связанной с первой ЭОФ, с выполнением условия ортогональности и т.д. В такой постановке задачи, ЭОФ являются собственными функциями ковариационной матрицы данных [15].

Первые 4 ЭОФ аномалий КМЛ для всех месяцев в период 1953–2016 гг. объясняют 80% и более изменчивости, а 6 ведущих ЭОФ аномалий ПТВ (по данным [11]) над сушей Северного полушария северней 30° с.ш. в период 1900–2016 гг. объясняют примерно 90% изменчивости температуры.

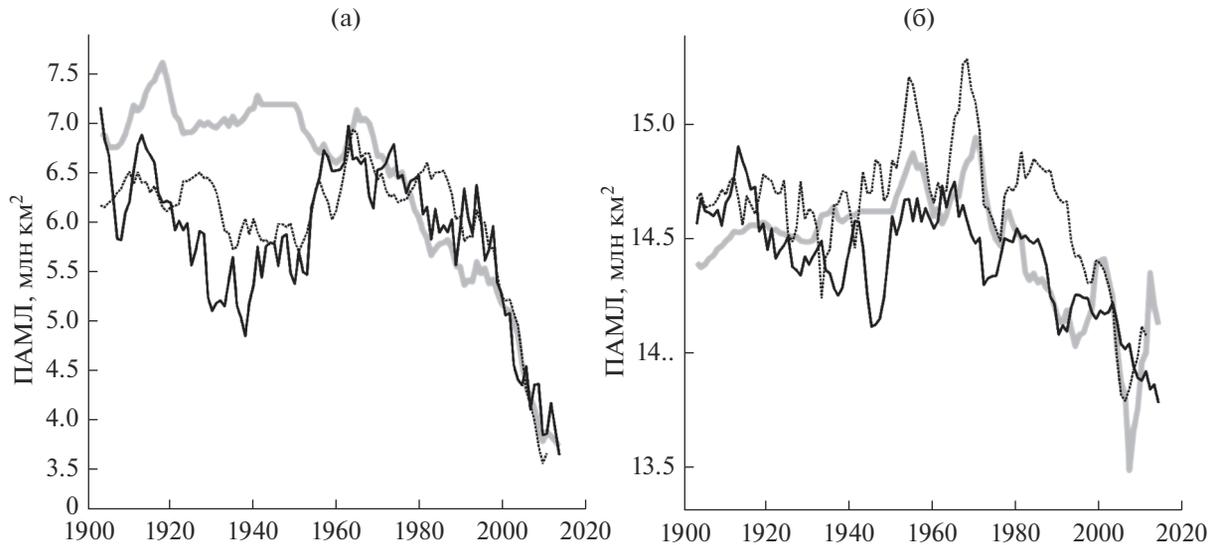


Рис. 1. Площадь морского льда (км²) (сглаженная пятилетним скользящим средним) для сентября (а) и марта (б) по данным HadISST 1.1 (серая линия), SIB1850 (Walsh) (черная пунктирная линия) и данным, восстановленным на основе линейной регрессии КМЛ на ПТВ (черная линия).

Это дает возможность для периода достоверных данных по КМЛ (1953–2016 гг.) архива HadISST1 построить регрессионную модель для рядов временных коэффициентов ЭОФ КМЛ с использованием временных коэффициентов ЭОФ ПТВ в качестве независимых переменных. Процедура восстановления КМЛ для периода 1900–1952 гг. выглядит следующим образом.

Среднемесячные поля концентрации морских льдов $SIC(\varphi, \lambda, t)$ для каждого месяца в период достаточно достоверных данных 1953–2016 гг. аппроксимируются в виде суммы 4-х пространственных ЭОФ $EOF_i^{SIC}(\varphi, \lambda)$ с временными коэффициентами $PC_i^{SIC}(t)$

$$SIC(\varphi, \lambda, t) = \sum_{i=1}^{N=4} PC_i^{SIC}(t) EOF_i^{SIC}(\varphi, \lambda),$$

где φ, λ, t – индексы широты, долготы и времени, соответственно. Поля аномалий приземной температуры воздуха $TS(\varphi, \lambda, t)$ для периода 1900–2016 гг. также представлены в виде суммы ЭОФ как

$$TS(\varphi, \lambda, t) = \sum_{j=1}^{N=6} PC_j^{TS}(t) EOF_j^{TS}(\varphi, \lambda).$$

Для периода 1953–2016 гг. методом наименьших квадратов рассчитываются коэффициенты b_j^i множественной линейной регрессии $PC_i^{SIC}(t)$ на $PC_j^{TS}(t)$, используя которые, можно восстановить временные коэффициенты (главные компоненты) для реконструированной концентрации

льда $PC_{rei}^{SIC}(t)$ и поля КМЛ $SIC_{re}(\varphi, \lambda, t)$ для периода 1900–1952 гг. как

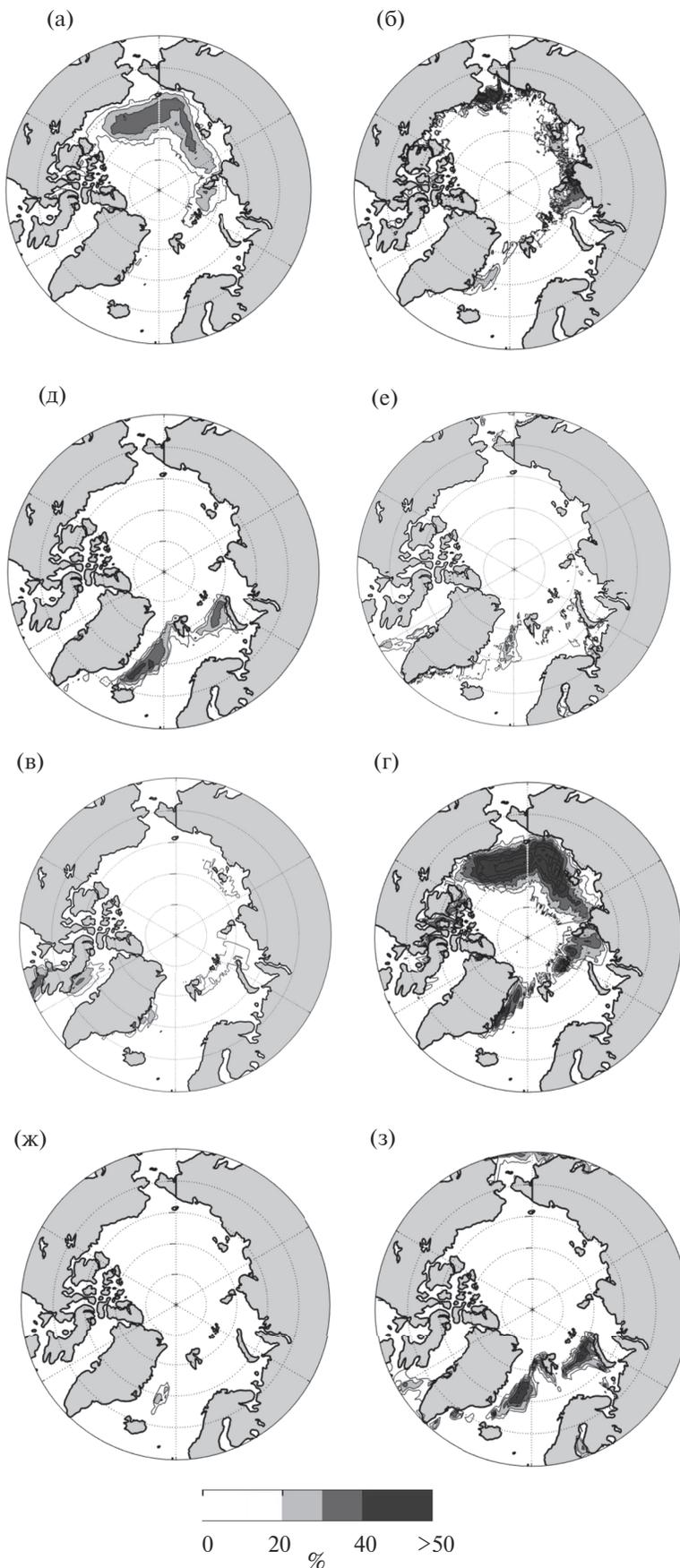
$$PC_{rei}^{SIC}(t) = \sum_{j=1}^{N=6} PC_j^{TS} b_j^i,$$

$$SIC_{re}(\varphi, \lambda, t) = \sum_{i=1}^{N=4} PC_{rei}^{SIC}(t) EOF_i^{SIC}(\varphi, \lambda).$$

С помощью этой модели можно восстановить временные коэффициенты ЭОФ КМЛ для периода 1900–1952 гг. и, соответственно, реконструировать поля КМЛ для этого периода. Такая процедура выполнялась для всех 12 месяцев. При отрицательных реконструированных значений КМЛ и значениях КМЛ более 100%, им присваивались значения 0 и 100% соответственно. Отметим, что таких значений было очень мало и как правило они не превышали 2–3%. Использование только первых 4 и 6 ЭОФ для КМЛ и ПТВ соответственно было связано с очень незначительным улучшением результатов при использовании большего количества ЭОФ. Схожая методика была использована для реконструкции общей ПАМЛ по прокси-данным в последнее тысячелетие [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общая площадь арктических морских льдов в марте и сентябре, рассчитанная по реконструированным данным, показана на рис. 1. Также для сравнения приведены значения ПАМЛ по данным HadISST1 и данным SIB1850. Для сентября (рис. 1а), месяца наиболее сильного сокращения ПАМЛ в современный период, все три массива



← **Рис. 2.** Разности КМЛ (в %) для сентября (верхний ряд,) и марта (нижний ряд) между средними значениями для периодов 1905–1915 гг. и 1935–1945 гг. по реконструированным данным (а, д); по данным SIB1850 (б, е) и по данным HadISST 1.1 (в, ж). Также показаны разности КМЛ между периодами 1970–1980 гг. и 2000–2010 гг. по данным HadISST 1.1 (г, з).

данных показывают достаточно хорошо согласованные изменения с начала 1960-х гг. с сокращением ПАМЛ примерно на 3 млн км², что указывает на успешность использованной методики реконструкции. В то время как данные HadISST1 демонстрируют в целом отсутствие климатических трендов на фоне декадных колебаний в период 1900–1960 гг., данные SIB1850 показывают долгопериодную отрицательную аномалию ПАМЛ во время потепления середины XX в. с продолжительным минимумом в 1930–1940-х гг. Величина аномалии составляет около 0.7 млн км² относительно значений в начале XX в. В реконструированных данных эта аномалия примерно в два раза больше и составляет около 1.5 млн км². Минимальные значения при этом достигаются в конце 1930-х гг.

Для марта (рис. 1б) существенные расхождения в ПАМЛ по разным данным отмечаются и в современный период. При этом следует отметить, что реконструированные данные лучше (в сравнении с SIB1850) описывают динамику ПАМЛ по “эталонным” для этого периода данным HadISST1. В частности, если ПАМЛ по данным SIB1850 систематически превышает значения HadISST1 с конца 1970-х гг. до второй половины 1990-х гг., то ПАМЛ по реконструированным данным хорошо согласуется с HadISST1. Два заметных максимума ПАМЛ по данным HadISST1 в середине 1950-х и конце 1970-х гг. по данным SIB1850 имеют примерно в два раза большую амплитуду и полностью отсутствуют в реконструированных данных. Заметим, такие значительные декадные флуктуации ПАМЛ в данных SIB1850 и HadISST1 не соответствуют аномалиям зимней температуры в Арктике [10], что ставит вопрос о реалистичности этих аномалий. Отрицательная аномалия ПАМЛ в середине XX в., отсутствующая в данных HadISST1, присутствует и в данных SIB1850, и в реконструированных данных. Амплитуда отрицательной аномалии больше по реконструированным данным, чем в данных SIB1850, и составляет примерно 0.4 и 0.6 млн км² соответственно. При этом минимум в реконструированных данных наступает позже и приходится на середину 1940-х гг., что по времени соответствует зимнему максимуму ПТВ в Арктике. Следует отметить, что декадные колебания ПАМЛ по реконструированным данным и данным SIB1850 антикоррелированы.

Пространственные изменения КМЛ во время потепления середины XX в. (1935–1945 гг.) относительно условий начала XX в. (1905–1915 гг.) для

марта и сентября по разным данным представлены на рис. 2. Также показаны изменения КМЛ по данным HadISST1 в период современного потепления (рис. 2г, 2з). Видно отсутствие существенных изменений КМЛ в середине XX в. по данным HadISST1 (рис. 2в, 2ж), небольшие аномалии в данных SIB1850 (рис. 2б, 2е) и значительное сокращение КМЛ в реконструированных данных главным образом в Гренландском и Баренцевом морях (рис. 2а, 2г). Пространственная картина аномалий схожа с изменениями в современный период, но характеризуется заметно более сильным уменьшением КМЛ в Гренландском море. В сентябре пространственная структура аномалий КМЛ в реконструированных данных аналогична современным изменениям с максимальным сокращением в секторе 120° в.д.–120° з.д., но имеет меньшую амплитуду и не содержит значимых аномалий в Гренландском море (рис. 2а).

ВЫВОДЫ

Выполненная пространственно-временная реконструкция КМЛ в Арктике для периода 1900–1952 гг. свидетельствует о значительной отрицательной аномалии ПАМЛ в середине XX в., отсутствующей в данных HadISST1. Амплитуда аномалии составляет примерно 1.5 млн км², что в два раза больше, чем в данных SIB1850, и имеет другую пространственную структуру. Полученные нами оценки в целом согласуются с реконструкцией общей ПАМЛ в сентябре в работе [12]. Сокращение ПАМЛ в середине XX в. по данным нашей реконструкции оставалось рекордным в XX в. вплоть до начала 2000-х гг., когда таяние морских льдов в Арктике значительно ускорилось (рис. 1). Реконструированные изменения зимой также указывают на более сильное сокращение ПАМЛ, чем по другим данным. Отрицательная аномалия ПАМЛ в середине XX в. согласуется с одновременным потеплением в Арктике в этот период и оба этих явления могут являться следствием естественной долгопериодной изменчивости климата, что указывает на возможный существенный вклад такой изменчивости и в современные изменения площади морских льдов и температуры в Арктике.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работы выполнены при поддержке РФФИ (в рамках проектов № 18-05-60216 и № 20-55-71003) и Госзадания ИГ РАН (тема № 0148-2019-0009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cavaliere D.J., Parkinson C.L., Gloersen P., Comiso J.C., Zwally H.J.* Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive-microwave multi-sensor data sets // *J. Geophys. Research.* 1999. V. 104. P. 15803–15814.
2. *Матвеева Т.А., Семенов В.А., Астафьева Е.С.* Ледовитость арктических морей и ее связь с приземной температурой воздуха в Северном полушарии // *Лед и снег.* 2020. Т. 60. № 1. С. 134–148.
3. *Мохов И.И., Семенов В.А.* Погодно-климатические аномалии в российских регионах в связи с глобальными изменениями климата // *Метеорология и гидрология.* 2016. № 2. С. 16–28.
4. *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. P. 509–512.
5. *Walsh J.E., Johnson C.M.* Analysis of Arctic sea ice fluctuations 1953–1977 // *J. Phys. Oceanogr.* 1978. V. 9. P. 580–591.
6. *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 // *J. Geophysical Research: Atmospheres.* 2003. V. 108. № D14. P. 4407.
7. *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. Т. 1. С. 28–51.
8. *Захаров В.Ф.* Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 213 с.
9. *Miles M.W., Divine D.V., Furevik T., Jansen E., Moros M., Ogilvie A.E.* A signal of persistent Atlantic multidecadal variability in Arctic sea ice // *Geophys. Research Letters.* 2014. V. 41. P. 463–469.
10. *Semenov V.A., Latif M.* The early twentieth century warming and winter Arctic sea ice // *The Cryosphere.* 2012. V. 6. P. 1231–1237.
11. *Harris I.C., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H.* Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 dataset // *Int. J. Climatol.* 2013. V. 34. P. 623–642.
12. *Alekseev G., Glok N., Smirnov A.* On assessment of the relationship between changes of sea ice extent and climate in the Arctic // *Int. J. Climatol.* 2016. V. 36. № 9. P. 3407–3412.
13. *Connolly R., Connolly M., Soon W.* Re-calibration of Arctic sea ice extent datasets using Arctic surface air temperature records // *Hydrological Sciences J.* 2017. V. 62. № 8. P. 1317–1340.
14. *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.
15. *Обухов А.М.* О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // *Изв. АН СССР. Сер. Геофизика.* 1960. № 3. С. 432–439.

Arctic Sea Ice in the First Half of the 20th Century: Temperature Based Spatiotemporal Reconstruction

V. A. Semenov^{1,2,*} and T. A. Matveeva²

¹*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences, Pyzhevskiy per., 3, Moscow, 119017 Russia*

²*Institute of Geography of Russian Academy of Sciences, Staromonetnyi per., 29-4, Moscow, 119017 Russia*

*e-mail: vasemenov@ifaran.ru

Global warming in recent decades has been accompanied by a strong shrink of the Arctic sea ice area in summer (10% per decade). To understand the reasons for such changes, it is necessary to evaluate a scale of long-term variability of the Arctic sea ice area in the period before a significant increase in anthropogenic emissions of greenhouse gases into the atmosphere. Current empirical data on the spatiotemporal dynamics of Arctic sea ice until the 1950s are characterized by significant gaps. In this study, we reconstructed the monthly average gridded sea ice concentration (SIC) in the first half of the 20th century using the relationship between the spatiotemporal features of SIC variability and surface temperature over the Northern Hemisphere. The reconstructed data show a significant negative anomaly of the Arctic sea ice area (about 1.5 million km² in September and 0.7 million km² in March) in the middle of the 20th century, that is significantly stronger than the corresponding anomaly in other gridded SIC datasets.

Keywords: Arctic sea ice, Early 20th Century Warming, Arctic climate