

## **Роль гидрометеорологических факторов и солнечной активности в межгодовых изменениях площади льдов Восточно-Сибирского моря**

© 2019 г. Л.А. Тимохов<sup>1\*</sup>, В.Е. Бородачев<sup>1</sup>, И.В. Бородачев<sup>1</sup>, Н.А. Вязигина<sup>1</sup>,  
Е.У. Миронов<sup>1</sup>, М. Янут<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup>Институт Морских и Полярных исследований им. Альфреда Вегенера, Бремерхафен, Германия

\*Itim@aari.nw.ru

## **Role of hydrometeorological factors and solar activity in interannual variability of ice extent in the East Siberian Sea**

L.A. Timokhov<sup>1\*</sup>, V.E. Borodachev<sup>1</sup>, I.V. Borodachev<sup>1</sup>, N.A. Vyazigina<sup>1</sup>, E.U. Mironov<sup>1</sup>, M. Janout<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup>Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Germany

\*Itim@aari.nw.ru

*Received June 22, 2018 / Revised November 2, 2018 / Accepted 22 March, 2019*

**Keywords:** *East Siberian Sea, ice coverage, interannual changes, multiple regression, hydrometeorological impact, sea ice, solar activity, statistical equations for diagnosis.*

### **Summary**

Interannual changes of the summer ice coverage were investigated, and the role of hydrometeorological factors and solar activity in long-period fluctuations of the ice area in the East Siberian Sea was determined. Multivariate statistical analysis of time series of the ice cover, hydrometeorological elements, and the solar activity (SA), was performed for the period from 1950 to 2012 with regard for the cross-correlations of the analyzed variables that made possible to develop the equations of interannual fluctuations of the ice coverage in the East Siberian Sea in August and September. The equations include the following variables: air temperature in June–August of the current year  $T_{VI-VIII}$ ; the atmospheric circulation presented by indices of Arctic oscillation (Arctic Oscillation, AO), Arctic dipole (Arctic Dipole, AD), Pacific North American oscillation (Pacific North American Oscillation, PNA); average annual runoff of river waters into the Laptev and East Siberian seas (RivLES) with a time shift of one and two years; average annual index of the North Atlantic thermal state (AMO) with a time lag of eight years; solar activity SA, presented by the average annual Wolf number with advancing of one year. Diagnostic calculations of the ice area by the obtained equations using the actual values of the indices did show a good agreement between the actual and calculated values in August and September from 1950 to 2012. These equations were used to calculate contribution of each factor to the general dispersion of fluctuations of the ice coverage. The most important factors influencing the ice cover of the Sea in August and September are: the air temperature; the atmospheric circulation, presented by the Arctic Oscillation at the end of winter; and Atlantic waters which are characterized by AMO with a time lag of eight years. The role of other factors, i.e. summer atmospheric circulation, river runoff into the above seas, and 11-year cycle of solar activity were found to be equal to only 5–10% for each. Basing on these estimates, it has been concluded that the obtained statistical equations may be used as the diagnostic models of interannual changes in the ice coverage.

**Citation:** Timokhov L.A., Borodachev V.E., Borodachev I.V., Vyazigina N.A., Mironov E.U., Janout M. Role of hydrometeorological factors and solar activity in interannual variability of ice extent in the East Siberian Sea. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019. 59 (2): 222–232. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-397>.

*Поступила 22 июня 2018 г. / После доработки 2 ноября 2018 г. / Принята к печати 22 марта 2019 г.*

**Ключевые слова:** *вклад гидрометеорологических факторов и солнечной активности, Восточно-Сибирское море, гидрометеорологическое воздействие, диагностические статистические уравнения, ледовитость, мультирегрессионный анализ, солнечная активность.*

Получены статистические уравнения межгодовых колебаний площади льдов Восточно-Сибирского моря в августе и сентябре. Рассчитан вклад каждого фактора в общую дисперсию колебаний ледовитости. К преобладающим факторам, влияющим на площадь льдов в эти месяцы, относятся: температура воздуха; Арктическое колебание в конце зимы; индекс теплового состояния Северной Атлантики. Вклад в общую дисперсию режима летней атмосферной циркуляции, речного стока, расхода вод через Берингов пролив и солнечной активности находится в пределах 5–10% для каждого фактора.

## Введение

Причины долгопериодных колебаний ледовитости арктических морей привлекают внимание учёных ввиду важности этого феномена для развития теории ледово-гидрологического режима Северного Ледовитого океана, совершенствования методов долгосрочных ледовых прогнозов и климата Арктики [1]. Наличие различных по продолжительности периодов и циклов в многолетних изменениях площади льдов Арктики отмечали многие учёные. Наиболее полно структура колебаний ледовитости арктических морей описана в исследовании [1], авторы которого отмечают, что в долгосрочных изменениях ледовитости арктических морей обнаруживается постепенное сокращение площади ледяного покрова от начала к концу XX в., которое можно выразить линейным трендом. Наиболее значительные линейные тренды ледовитости наблюдаются в приатлантическом регионе; вклад линейного тренда в дисперсию ледовитости морей, расположенных к востоку от Северной Земли, незначим. На фоне линейных трендов в изменениях площади льдов отмечаются колебания, имеющие полициклический характер. Как отмечают авторы этого исследования, спектры колебаний характеризуются более или менее значимыми пиками на периодах 50–60 лет, около 20,8–12 лет, 5–7 и 2–3 лет. В западном регионе преобладают низкие частоты (50–60 лет и около 20 лет), в восточном – высокие частоты (от 2–3 до 8–12 лет) [1].

Документально установлены факты 11-летней изменчивости числа пятен на Солнце (числа Вольфа – главного показателя интенсивности солнечной активности) и 11-летнего цикла, например, толщины колец деревьев, который представляет собой интегральный показатель состояния климата, что свидетельствует о влиянии солнечной активности на климат Земли [2]. Дискуссия о роли солнечной активности в долгопериодных изменениях гидрометеорологических процессов продолжается не в результате отрицания реакции природных процессов на потоки солнечной энергии. Споры вызывают механизм воздействия солнечной активности на климат, в том числе ледовитость морей, а также трудность выделения доли влияния солнечной активности по сравнению с другими геофизическими воздействиями.

Известны неудачные попытки В.Ю. Визе [3] получить статистическую связь между ледовито-

стью, например, Баренцева моря в мае–июне с годовыми числами Вольфа. Связь оказалась непостоянной: с 1896 по 1912 г. она была обратной, с 1913 по 1935 г. – прямой, а затем знак связи поменялся на противоположный. Т.И. Санцевич [4] на коротком ряду (22 года) обнаружила корреляционную связь между ледовитостью восточного района Арктики и солнечной активностью, а также между показателем дрейфа льда в Арктическом бассейне и солнечной активностью. В развитие этой темы авторы работы [5] установили влияние солнечной активности на формирование крупных аномалий ледовитости: высокому уровню активности соответствует большая повторяемость крупных аномалий, низкому уровню – меньшая повторяемость. По мнению А.Г. Егорова [6], в средней тропосфере наблюдается настроенная на структуру солнечного цикла длительная тенденция в пространственной изменчивости атмосферной циркуляции, которая заключается в том, что усиление солнечной активности в 18–20-летних циклах сопровождается многолетней активизацией циклонической деятельности в умеренной зоне над Атлантическим и Тихим океанами, которая в 21–23-летних циклах постепенно и упорядоченно смещается в высокоширотную зону над Северным Ледовитым океаном. В свою очередь пространственно-временное чередование циклонической и антициклонической циркуляции сопровождается формированием многолетних потеплений и похолоданий в Арктике [6]. По мнению А.Г. Егорова, солнечное воздействие на гидросферу и ледяной покров протекает не непосредственно, а через атмосферную циркуляцию.

Цель настоящей работы состоит в решении двух задач: 1) в рамках физико-статистического подхода разработать модель, адекватно описывающую долгопериодные колебания летней ледовитости Восточно-Сибирского моря; 2) получить оценки вклада гидрометеорологических факторов и 11-летнего цикла солнечной активности в межгодовые изменения ледовитости.

## Структура межгодовой изменчивости ледовитости

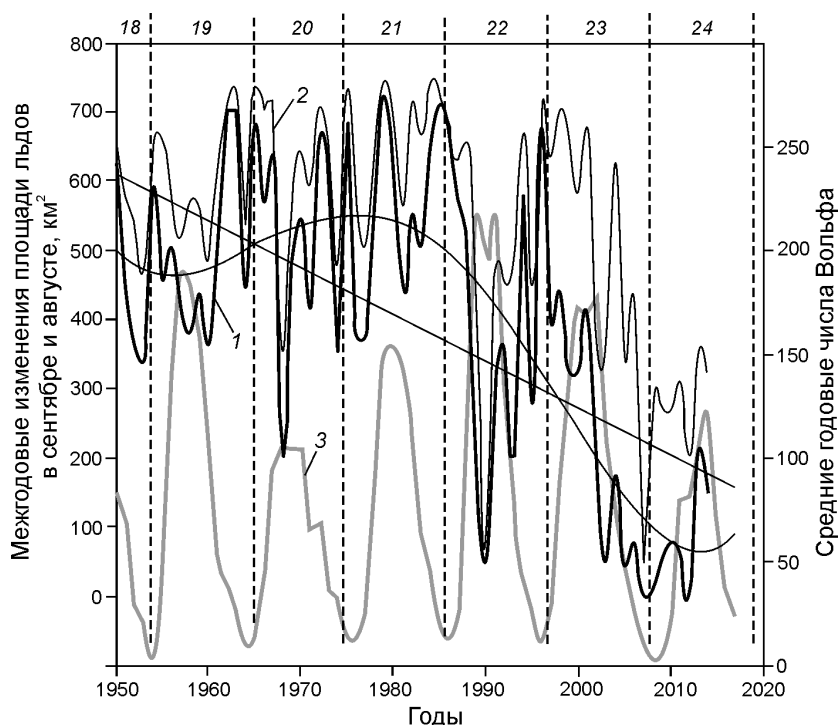
Исследуя долговременные колебания ледовитости Восточно-Сибирского моря, нельзя не остановиться на его географической характеристике. Это море расположено между Новосибирскими островами и о. Врангеля. Его

площадь — 913 тыс. км<sup>2</sup>. Средняя глубина — 54 м, а максимальная достигает 915 м. В Восточно-Сибирское море впадают реки Алазея, Индигирка и Колыма, среднегодовой сток которых в три раза меньше стока рек в море Лаптевых и более чем в шесть раз меньше стока рек в Карское море [7]. В материк вдаётся залив Чаунская губа. Море характеризуется большой ледовитостью, средняя величина которой при максимальном очищении его ото льдов составляет 65%. Для судоходства большие сложности вызывают льды Айонского ледяного массива. Течения моря изучены мало и выражаются слабовыраженной циклонической циркуляцией [8]. Считается, что потоки холодных вод с севера приносят много паковых (многолетних) льдов из Арктического бассейна при развитии антициклонического круговорота вод и льдов в Канадской котловине. Установлено влияние поступления тихоокеанских вод через Берингов пролив на солёность верхнего слоя моря [9]. Роль тёплых и солёных вод атлантического происхождения в формировании гидрологического режима Восточно-Сибирского моря также изучена недостаточно. Отметим, что климат моря — достаточно суровый: средняя температура воздуха зимой составляет —30 °С и ниже, а летом — около 0 °С.

На рис. 1, характеризующем межгодовые колебания площади льдов в Восточно-Сибирском

море, приведены среднемесячные значения ледовитости за период с 1946 по 2014 г., рассчитанные по данным, приведённым на сайте ААНИИ [10]. Ледовитость определяется площадью ледяного покрова в пределах границ моря или отношением площади льдов к площади моря. Из графиков рис. 1 видно, что в межгодовых изменениях ледовитости в августе и сентябре наблюдается тесная сопряжённость. Коэффициент корреляции между изменениями площади льдов в июле (график не приводится) и августе равен 0,82, а между ледовитостью в августе и сентябре — 0,90. Связь изменений ледовитости в летне-осенние сезоны указывает на определённую инерционность ледовых процессов в Восточно-Сибирском море в период летней деградации ледяного покрова. Установлена также связь между ледовитостью в августе и сентябре с летне-осенним сезоном предыдущего года. Коэффициенты корреляции между ледовитостью в августе и сентябре текущего года и ледовитостью за тот же период предыдущего года равны соответственно 0,51 и 0,66. Этот важный результат указывает на существенную зависимость ледовитости текущего года от предыстории развития ледовых процессов.

В межгодовой изменчивости площади льдов Восточно-Сибирского моря отмечаются значительные линейный тренд и нелинейный, аппрок-



**Рис. 1.** Межгодовые изменения площади льдов (км<sup>2</sup>) в сентябре (1) и августе (2) в Восточно-Сибирском море, а также линейный и нелинейный (полином 4-й степени) тренды сентябрьской ледовитости. В нижней части рисунка приведена кривая (3) изменения среднегодовых чисел Вольфа. Вертикальными прерывистыми линиями отмечены пределы циклов СА, номера которых указаны в верхней части рисунка

**Fig. 1.** Interannual changes of the sea ice area (km<sup>2</sup>) in September (1) and August (2) in the East Siberian Sea and also linear and nonlinear (a polynomial of the 4th degree) trends of September ice cover. The curve (3) of changes of average annual numbers of Wolf is given in the lower part of the drawing. Vertical dash lines have noted limits of cycle's solar activity (SA) which numbers are specified in the top part of the drawing

симируемый полиномом 6-й степени. За счёт линейного тренда ледовитость моря в сентябре уменьшилась с 1948 по 2012 г. на 432 тыс. км<sup>2</sup>, что сравнимо с удвоенным среднеквадратическим отклонением для всего ряда, равным 426 тыс. км<sup>2</sup>. Нелинейный тренд близок к 60-летней цикличности, удвоенная амплитуда которой (A) может быть оценена как  $2A = 260$  тыс. км<sup>2</sup>. Вместе с тем временной ряд с 1946 по 2014 г. не позволяет получить статистически значимую оценку 60-летней цикличности.

Главные факторы, влияющие на динамику льдов и эволюцию ледяного покрова, известны. За образование льда, его нарастание и таяние ответственны: температура воздуха; солнечная радиация; теплосодержание верхнего слоя моря в период, предшествующий льдообразованию; толщина снежного покрова. Касательные напряжения ветра и денивилиция уровня моря определяют дрейф льдов и перераспределение ледяного покрова [1]. Термодинамические модели, в которые включены перечисленные силы и потоки, успешно используются для расчёта и прогноза короткопериодных и сезонных ледовых процессов. Динамика же межгодовых колебаний площади льдов имеет свои специфические особенности, которые отличают её от краткосрочных ледовых процессов. Так, построение термогидродинамических моделей климатической изменчивости площади льдов требует включения ледяного покрова в общую климатическую модель, в которой эволюция морского ледяного покрова – лишь одна из компонент. Однако уровень современных моделей климата пока не позволяет получить адекватную картину межгодовых изменений состояния ледяного покрова даже в диагностическом режиме. Отметим, что ни одна климатическая модель не смогла предсказать аномальное уменьшение ледяного покрова в Арктике в 2007 г. Поэтому в настоящей работе используется эмпирический подход и исследование основывается на статистических методах анализа данных по ледовитости и эмпирических сведениях о факторах, вызывающих долгопериодные колебания ледовитости.

*Эмпирический подход*, часто называемый физико-статистическим, требует тщательного подбора ключевых факторов (предикторов) для включения в модель межгодовых изменений площади льдов. Ввиду ограниченности наблю-

дений или отсутствия тех параметров атмосферы и океана, которые следуют из физической модели ледовых процессов, используются характеристики, представляющие собой только косвенные показатели действующего фактора. Например, поступление или вынос льдов через северную границу Восточно-Сибирского моря зависит от циркуляции льдов в Амеразийском суббассейне и положения фронтальной зоны Трансарктического дрейфа [4]. Однако временные ряды поверхностной циркуляции вод и льдов, а также данные о положении фронтальной зоны Трансарктического дрейфа отсутствуют. Поэтому мы использовали косвенный показатель положения фронтальной зоны – температуру атлантических вод в районе хребтов Ломоносова и Менделеева.

Известно, что усиление притока вод атлантического происхождения в 1990-х годах вдоль континентального склона Евразийского бассейна в глубь Северного Ледовитого океана к Канадскому бассейну вызвало соответствующий сдвиг фронтальной области между водами атлантического и тихоокеанского происхождения в Центральной Арктике в сторону Амеразийского суббассейна [11]. Именно поэтому для индификации положения фронтальной зоны мы выбрали показатель теплового состояния атлантических вод в районе котловины Подводников между хребтами Ломоносова и Менделеева. Поскольку аномалия индекса теплового состояния Северной Атлантики (Atlantic Multi-decadel Oscillation, АМО) от Северной Атлантики путём адвекции достигает района котловины Подводников примерно за восемь лет, в качестве индекса мы приняли значение АМО, равное  $-8$ . Положительная аномалия теплового состояния в районе котловины Подводников ассоциирует с восточным положением фронтальной зоны, сокращением площади Канадского антициклонического круговорота и формированием выноса льдов из Восточно-Сибирского моря. Отрицательная аномалия ассоциирует с западным положением оси Трансарктического течения, расширением Канадского антициклонического круговорота и затоком льдов в Восточно-Сибирское море. В качестве характеристики солнечной активности был выбран 11-летний цикл чисел Вольфа [12]. Последующие разделы будут посвящены выбору факторов (предикторов) и построению моделей долгопериодных изменений площади льдов.

### О сопряжённости изменений ледовитости с 11-летним циклом солнечной активности

Поскольку вопрос о влиянии солнечной активности на ледовитость вызывал и вызывает много вопросов, более подробно обсудим структуру сопряжённости изменений ледовитости и солнечной активности по эмпирическим данным. На рис. 1 приведена кривая изменения средних годовых чисел Вольфа. Вертикальными прерывистыми линиями отмечены пределы циклов солнечной активности, а в верхней части рисунка указаны их номера:

- 18 – февраль 1944 г. – апрель 1954 г.;
- 19 – апрель 1954 г. – октябрь 1964 г.;
- 20 – октябрь 1964 г. – июнь 1976 г.;
- 21 – июнь 1976 г. – сентябрь 1986 г.;
- 22 – сентябрь 1986 г. – май 1996 г.;
- 23 – май 1996 г. – январь 2009 г.;
- 24 – январь 2009 г. – март (?) 2017 г.

Каждый из циклов солнечной активности состоит из двух фаз – роста и спада. При этом продолжительность фазы роста цикла солнечной активности существенно меньше продолжительности фазы спада [13]. При развитии каждой из них наблюдаются разные по мощности потоки солнечной энергии. В первой фазе развития цикла увеличение энергии Солнца подтверждается ростом числа солнечных пятен. В период развития второй фазы цикла поток солнечной энергии, достигающий земной поверхности, уменьшается от максимума до минимума. При сопоставлении графиков межгодовых изменений ледовитости и солнечной активности обращает на себя внимание тот факт, что априорно выделенный цикл изменения ледовитости имеет некоторую аналогию с циклами солнечной активности. Так, повышение числа солнечных пятен на фазе роста солнечной активности сопровождалось общим понижением аномалий ледовитости в Восточно-Сибирском море (см. рис. 1). Действительно, 1947 г. – это год наступления максимума солнечной активности в цикле 18, при этом наблюдалась отрицательная аномалия ледовитости моря; 1957 г. – год наступления минимума ледовитости и одновременно год наступления максимума в цикле 19 солнечной активности; 1968 г. – год минимума ледовитости совпал с годом наступления максимума в цикле 20 солнечной активности. Однако в дальнейшем, в цик-

лах 21 и 22 наступил сбой в выявленной закономерности и годы минимумов в циклах аномалий ледовитости совпадали (были близки) с годами минимумов в указанных циклах солнечной активности. Правда, уже в 1990 г. минимум в цикле аномалий ледовитости оказался вновь близок к максимуму в цикле 23 солнечной активности.

Корреляционный анализ связи ледовитости в июле, августе и сентябре с солнечной активностью для каждого цикла показал неоднозначные результаты. В циклах 18, 21 и 23 связь ледовитости с солнечной активностью была синхронной или с запаздыванием на один год по отношению к солнечной активности, а коэффициент корреляции в пределах 0,24–0,43 был положительным, т.е. за повышением солнечной активности в циклах следовало увеличение ледовитости. В циклах 19, 20 и 22 коэффициент корреляции был отрицательным и находился в пределах 0,62–0,80 с запаздыванием один год, что можно трактовать как уменьшение ледовитости через год после увеличения солнечной активности. При анализе полных временных рядов ледовитости и солнечной активности за период 1948–2014 гг. установлена слабая связь ледовитости с солнечной активностью. Коэффициенты корреляции ледовитости в июле, августе и сентябре с числами Вольфа оказались незначимыми и равными соответственно –0,05, –0,13 и –0,14.

Неоднозначность результатов прямой корреляции между ледовитостью и солнечной активностью подтверждает неудачные попытки использовать 11-летний цикл солнечной активности в качестве предиктора для долгосрочного прогноза ледовитости [3]. Возможно, причина отсутствия или слабой прямой связи исходного временного ряда ледовитости с солнечной активностью заключается в том, что колебания площади льдов индуцируются не только 11-летним циклом солнечной активности, но и другими факторами. Наша гипотеза заключается в следующем: на определённых временных стадиях корреляция между изменениями ледовитости и солнечной активности ослабевает или исчезает в силу того, что усиливается воздействие других гидрометеорологических процессов, которые способны завуалировать статистическую связь ледовитости и солнечной активности. Поэтому роль 11-летнего цикла солнечной активности в межгодовой изменчивости целесообразно исследовать в рамках многомерного ста-

Таблица 1. Результаты анализа статистической связи переменных  $L_{VIII}$  и  $L_{IX}$  со значимыми предикторами

Предиктора	Парциальный коэффициент корреляции $r$	Стандартная ошибка $\Delta r$	Коэффициент пропорциональности $A$	Стандартная ошибка $\Delta A$	Уровень значимости p-level
$L_{VIII}$ : коэффициент множественной корреляции $R = 0,861$ ; $R^2 = 0,741$ ; скорректированное $R^2 = 0,722$					
Свободный член	–	–	7110	1458	0,00001
$T_{VI-VIII}(0)$	–0,368	0,082	–149	33	0,00003
$AO_{I-IV}(0)$	–0,360	0,071	–91	18	0,00000
$AMO_y(-8)$	–0,320	0,078	–29 282	7091	0,00012
$RivLES_y(-2)$	–0,228	0,076	–0,4	0,12	0,00404
$SA_y(-1)$	–0,193	0,071	–0,5	0,19	0,00838
$AD_{VI-VIII}(0)$	–0,169	0,078	–74	34	0,03477
$L_{IX}$ : коэффициент множественной корреляции $R = 0,868$ ; $R^2 = 0,753$ ; скорректированное $R^2 = 0,724$					
Свободный член	–	–	8005	1867	0,00009
$T_{VI-VIII}(0)$	–0,436	0,072	–230	38	0,00001
$AO_{I-IV}(0)$	–0,257	0,068	–63	17	0,00039
$AMO_y(-8)$	–0,272	0,078	–32 422	9292	0,00096
$PNA_{VI-IX}(0)$	–0,217	0,067	–117	36	0,00214
$SA_y(-1)$	–0,187	0,069	–0,7	0,24	0,00876
$BER_y(-1)$	–0,175	0,074	–327	137	0,02094
$RivLES_y(-1)$	–0,162	0,074	–0,3	0,15	0,03193

статистического анализа с включением всех факторов, влияющих на изменчивость ледовитости.

#### Статистические модели долгопериодной изменчивости площади льдов в летний период

Для построения статистической модели долгопериодных изменений площади льдов мы использовали аппарат мультирегрессионного анализа стандартного пакета программ «СТАТИСТИКА». В качестве переменных были выбраны следующие предикторы:

1) средняя для акватории Восточно-Сибирского моря температура воздуха  $T_{k-l}(-m)$ , где индексы  $k-l$  означают период осреднения параметра, например, от месяца  $k = VI$  до месяца  $l = VIII$ ; в скобках указан временной сдвиг в годах параметра относительно ледовитости; знак «минус» означает, что предиктор опережает ледовитость на  $m$  лет;

2) средний годовой расход через Берингов пролив  $BER(-m)$ ;

3) индекс теплового состояния Северной Атлантики, представленный средним годовым индексом с заблаговременностью восемь лет –  $AMO(-8)$  [14];

4) индексы атмосферной циркуляции, представляющие собой разложение приземного атмосферного давления от широты  $60^\circ$  до полю-

са по эмпирическим ортогональным функциям (Empirical Orthogonal Function, EOF) [15].

Отметим, что моды разложения подобны тем, которые были получены в работе J.E. Overland, M. Wang [16] при разложении приземного атмосферного давления от широты  $70^\circ$  до полюса. Первую моду EOF1 называют Арктическим колебанием (Arctic Oscillation, AO), вторую моду EOF2 – Арктическим диполем (Arctic Dipole, AD) с осью вдоль нулевого меридиана. Третья мода EOF3 представляет собой диполь с осью, перпендикулярной оси AD, и по традиции её называют Тихоокеанско-Североамериканским индексом (Pacific North American oscillation, PNA). Процедура мультирегрессионного анализа учитывает перекрёстные связи переменных, исключает зависимые переменные и выделяет реально значимые факторы, определяющие межгодовую изменчивость ледовитости. В испытаниях использовано около 50 переменных с разными интервалами осреднения и временными лагами. В результате статистического анализа найдены индексы со значимыми частными коэффициентами корреляции ( $r$ ) и получены оценки статистической их значимости (табл. 1).

Коэффициент множественной корреляции  $R$  ледовитости в августе  $L_{VIII}$  с шестью предикторами ( $T_{VI-VIII}(0)$ ,  $AO_{I-IV}(0)$ ,  $AMO_y(-8)$ ,  $RivLES_y(-2)$ ,  $SA_y(-1)$ ,  $AD_{VI-VIII}(0)$ ) для временного ряда 1950–2008 гг. равен  $R = 0,861$  (см. верхнюю часть

табл. 1). Для площади льдов в сентябре  $L_{IX}$  теснота связи с семью предикторами ( $T_{VI-VIII}(0)$ ,  $AO_{I-IV}(0)$ ,  $AMO_y(-8)$ ,  $PNA_{VI-IX}(0)$ ,  $SA_y(-1)$ ,  $Ver_y(-1)$ ,  $RivLES_y(-1)$ ) оказалась равной  $R = 0,868$  (см. нижнюю часть табл. 1). Парциальный коэффициент корреляции  $r$  показывает относительный вклад предиктора в общую вариацию ледовитости, а коэффициент  $A$  представляет собой числовой показатель при предикторе в уравнении множественной корреляции. Для нас самая важная характеристика – статистическая значимость результатов, т.е., в какой степени полученные результаты отражают реальные соотношения. Статистическая значимость, определяемая величиной  $p$ -level, представляет собой вероятность ошибки, которая участвует в принятии результата как действительного. Например,  $p$ -level = 0,05 указывает, что существует вероятность 5% и что связь между переменными – «случайность». Обычно считается, что результаты достоверно отражают общую картину, если значение  $p$ -level меньше 0,05 (т.е. 5%). Результаты на уровне  $p \leq 0,01$  обычно считаются статистически значимыми, а на уровне  $p \leq 0,005$  или  $p \leq 0,001$  часто называются «высоко значимыми».

Рассчитанные нами уровни значимости предикторов, указанные в последней графе табл. 1, значительно меньше порогового  $p$ -level = 0,05. Для ледовитости в августе  $L_{VIII}$  уровень статистической значимости большинства предикторов оказался «высоко значимым» и только уровень значимости предиктора  $AD_{VI-VIII}(0)$  находится в категории «статистически значимого». Для ледовитости  $L_{IX}$  пять предикторов вошли в категорию «статистически высоко значимых» и два предиктора в категорию «статистически значимых». Таким образом, полученные нами результаты множественной корреляции с большой вероятностью отражают реальную связь ледовитости с выбранными предикторами. На основании табл. 1 мы составили два уравнения для межгодовой изменчивости площади льдов в августе  $L_{VIII}$  и сентябре  $L_{IX}$ :

$$L_{VIII} = -149,3T_{VI-VIII}(0) - 74,5AD_{VI-VIII}(0) - 90,9AO_{I-IV}(0) - 29281,9AMO_y(-8) - 0,4RivLES_y(-2) - 0,5SA_y(-1) + 7110,3; \quad (1)$$

$$L_{IX} = -224,0T_{VI-VIII}(0) - 112,9PNA_{VI-IX}(0) - 73,8AO_{I-IV}(0) - 33449,5AMO_y(-8) - 324,4Ver_y(-1) - 0,4RivLES_y(-1) - 0,8SA_y(-1) + 8005,0. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) имеют схожую структуру, и влияние каждого фактора из правых частей уравнения имеет физическое объяснение. Так, *температура воздуха в весенне-летний период*  $T_{VI-VIII}(0)$ , входящая в уравнения с отрицательным знаком, играет ключевую роль в таянии ледяного покрова. При положительных аномалиях температуры воздуха наблюдается более быстрое сокращение площади льдов в море и наоборот. Влияние *Арктического диполя*, вошедшего в уравнение (1) со знаком минус, проявляется в следующем. Положительное значение Арктического диполя  $AD_{VI-VIII}(0)$ , которое формируется в случае положительной аномалии приземного атмосферного давления над Канадско-Аляскинской областью и отрицательной аномалии давления над Сибирью, сопровождается усилением южных ветров над акваторией Восточно-Сибирского моря, в результате площадь льдов быстро уменьшается, как это наблюдалось весной и летом 2007 г. Обратный характер имеет ситуация при отрицательных значениях индекса. Механизм влияния *индекса*  $PNA_{VI-VIII}(0)$  подобен Арктическому диполю, с учётом того, что *ось диполя*  $PNA_{VI-VIII}(0)$  перпендикулярна оси Арктического диполя.

Индекс *Арктического колебания*  $AO_{I-IV}(0)$  также входит в уравнения с отрицательным знаком. Присутствие этого индекса можно трактовать как влияние зимне-весенней атмосферной циркуляции на колебания летней ледовитости. Отрицательное значение  $AO_{I-IV}(0)$  соответствует положительной аномалии приземного атмосферного давления над районом полюса и развитой области антициклоничности в Арктическом бассейне, ветровое влияние которой способствует расширению антициклонического круговорота в Американо-Сибирском суббассейне. В результате образуется заток льдов из Канадской котловины и моря Бофорта в Восточно-Сибирское море и возникают условия для формирования положительной аномалии ледовитости моря и тяжёлых ледовых условий, как это наблюдалось в 1970-е годы. Положительное значение индекса  $AO_{I-IV}(0)$ , ассоциируемое с доминированием циклонического режима атмосферной циркуляции, способствует уменьшению площади антициклонического круговорота льдов; ось трансарктического дрейфа смещается на восток, а начало трансарктического дрейфа формируется в северной части Восточно-Сибирского моря. В результате льды выносятся из моря, уменьшая его ледовитость, как это было в 2007 г.

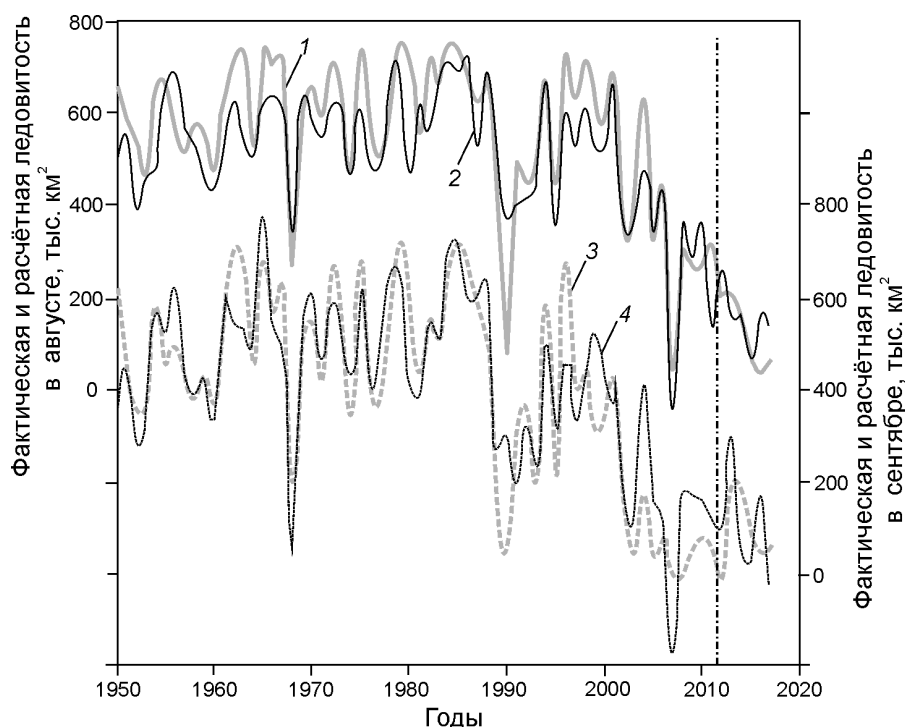
Суммарный среднегодовой речной сток в моря Лаптевых и Восточно-Сибирское  $RivLES_y(-1)$ ,  $RivLES_y(-2)$  в годы увеличения пресноводного стока через один—два года отражается на уменьшении ледовитости моря. Механизм влияния связан, вероятно, с плотностными процессами. В годы повышенного пресноводного стока возрастает стерический уровень в прибрежной зоне, что способствует усилению вдольберегового течения с запада на восток и приводит к уменьшению площади льдов в летний период.

Положительная аномалия индекса *теплового состояния Северной Атлантики*  $AMO_y(-8)$  связана с усилением притока тепла атлантических вод в Арктический бассейн и сопровождается смещением на восток фронтальной зоны Трансарктического геострофического течения. За счёт этого возникает преимущественный вынос льдов из Восточно-Сибирского моря и уменьшается ледовитость моря, как это и следует из уравнений. При отрицательной аномалии индекса наблюдается противоположная ситуация.

Влияние *притока тихоокеанских вод* (индекс  $Beq_y(-1)$ ) через Берингов пролив в Чукотское и частично Восточно-Сибирское моря на ледовитость Восточно-Сибирского моря связано, по нашему мнению, с изменением циркуляции тихоокеанских вод. В период увеличенного притока

(положительная аномалия индекса  $Beq_y(-1)$ ) тихоокеанских вод они распространяются преимущественно вдоль аляскинского побережья, как это наблюдалось в начале текущего столетия. В период ослабленного поступления тихоокеанских вод, как это происходило в 1970–80-е годы, на востоке Восточно-Сибирского моря наблюдался частичный заток тихоокеанских вод, который способствовал поступлению льдов Чукотского моря в Восточно-Сибирское и увеличению положительной аномалии его ледовитости. Солнечная активность, представленная в уравнении среднегодовыми числами Вольфа  $SA_y(-1)$ , всегда способствует уменьшению ледовитости, при этом увеличение солнечной активности через год вызывает большее уменьшение площади льдов и наоборот.

Отметим, что наша физическая модель межгодовой изменчивости ледовитости, основанная на уравнениях (1) и (2), в определённой мере согласуется с выводами Т.И. Санцевич [4] и следствия, выводимые из уравнений, не противоречат результатам В.П. Карклина и Е.Г. Ковалева [5]. По уравнениям (1) и (2) проведены расчёты ледовитости на основе фактических значений индексов правых частей уравнений. На рис. 2 приведены кривые фактических и расчётных значений площади льдов в августе и сентябре на зависимом материале с 1950 по 2012 г. (на



**Рис. 2.** Сопоставление графиков фактических межгодовых изменений ледовитости Восточно-Сибирского моря в августе (1) и сентябре (3) с рассчитанными по уравнениям августовской (2) и сентябрьской (4) ледовитости. Вертикальная штрих-пунктирная линия отделяет период 2013–2017 гг., рассчитанный на независимом материале

**Fig. 2.** Comparison of interannual changes of the sea ice cover of the East Siberian Sea in August (1) and September (3) with calculated on the equations August (2) and a September (4) ice cover.

The vertical dash-dotted line separates the period 2013–2017 calculated on independent material



рис. 2 период ограничен вертикальной штрих-пунктирной линией). Расчётные значения ледовитости довольно близко совпадают с фактическими. Общие коэффициенты корреляции для августовской и сентябрьской ледовитости получились равными 0,857 и 0,868 соответственно, а уравнения описывают около 73% общей дисперсии августовской ледовитости и около 76% общей дисперсии сентябрьской ледовитости. Отметим, что расчёты успешно воспроизвели большинство больших пиков изменения ледовитости.

По уравнениям проведены также расчёты по не вошедшим в разработку уравнений (1) и (2) гидрометеорологическим индексам и солнечной активности за период 2013–2017 гг. На рис. 2 расчётные значения ледовитости расположены вправо от вертикальной штрих-пунктирной линии на рисунке. Как видно из рис. 2, в целом расчётные значения ледовитости согласуются с фактическими колебаниями ледовитости в данный период. При этом общий коэффициент корреляции с включением результатов 2013–2017 гг. вырос. Для августовской и сентябрьской ледовитости коэффициенты получились равными соответственно 0,902 и 0,879, что свидетельствует об устойчивости структуры уравнений в последующие пять лет. На основании полученных статистических оценок и вида графиков на рис. 2 есть предположение, что уравнения (1) и (2) достаточно близко описывают межгодовые изменения ледовитости и могут быть использованы в качестве диагностических моделей долгопериодных колебаний площади льдов в Восточно-Сибирском море.

### Оценки вклада гидрометеорологических факторов и солнечной активности в межгодовые изменения площади льдов

Поскольку дисперсия левой части уравнений (1) и (2) равна сумме дисперсий предикторов правой части, умноженных на квадрат коэффициентов пропорциональности, эти уравнения были использованы для расчёта вклада каждого слагаемого правых частей уравнений в общую дисперсию изменений площади льдов. В табл. 2 приведены величины вклада в процентах каждого слагаемого правой части уравнений в общую дисперсию. Из оценок следует, что *преобладающий фактор, влияющий на площадь льдов в августе и сентябре, — ат-*

Таблица 2. Вклад гидрометеорологических индексов (строки 1–8) и солнечной активности (строка 9) в общую дисперсию межгодовой изменчивости ледовитости в августе ( $L_{VIII}$ ) и сентябре ( $L_{IX}$ ) в Восточно-Сибирском море, %

Строки	Индексы	Ледовитость в августе $L_{VIII}$	Ледовитость в сентябре $L_{IX}$
1	$T_{VI-VIII}(0)$	27	38
2	$AO_{I-IV}(0)$	25	14
3	$AMO_{I-XII}(-8)$	12	19
4	$AD_{VI-VIII}(0)$	8	—
5	$PNA_{VI-IX}(0)$	—	9
6	$RivLES_y(-2)$	8	—
7	$RivLES_y(-1)$	—	8
8	$Be_y(-1)$	—	7
9	$Sun(-1)$	5	10

*мосферные тепловые потоки.* Температура воздуха  $T_{VI-VIII}(0)$  (см. строку 1 в табл. 2) определяет 27–38% изменчивости ледовитости. Большой вес в межгодовой изменчивости ледовитости приходится на *Арктическое колебание в предвесенний период* ( $AO_{I-IV}(0)$ ) (см. строку 2 в табл. 2); вклад осреднённого индекса за январь–апрель можно трактовать как влияние предыстории атмосферной циркуляции на колебания летней ледовитости.

Следующий по значимости — *индекс теплового состояния Северной Атлантики*  $AMO_{I-XII}(-8)$  с оценками 12 и 19% вклада в общую дисперсию межгодовой изменчивости ледовитости соответственно в августе и сентябре (см. строку 3 табл. 2). Столь большое влияние этого индекса объяснимо ввиду особенности взаимодействия моря с Арктическим бассейном. Восточно-Сибирское море — открытое, поэтому через протяжённую северную границу происходит как вынос льдов в Арктический бассейн, так и поступление льдов из него при расширении или сокращении Канадского антициклонического круговорота вод и льдов. Ранее мы уже дали трактовку индекса  $AMO_y(-8)$  как маркера положения фронтальной зоны трансарктического дрейфа. Положительные аномалии индекса связывают с восточным положением оси трансарктического течения, при котором доминирует вынос из моря льдов пограничной ветвью Трансарктического течения и Канадского антициклонического круговорота. Таким образом, индексы  $AO_{I-IV}(0)$  и  $AMO_{I-XII}(-8)$  моделируют главные компоненты ветрового и геострофического потока льдов на северной границе моря и их влияние на колебания площади льдов в летний период.

Значимость *летних индексов атмосферной циркуляции* ( $AD_{VI-VIII}(0)$  и  $PNA_{VI-IX}(0)$ ) значительно меньше (см. строки 4 и 5 табл. 2) по сравнению с факторами, указанными ранее. И это понятно, поскольку в летний период интенсивность атмосферной циркуляции в Арктике, как правило, значительно ослабевает [1]. В то же время в отдельные годы роль Арктического диполя может существенно возрасти, например, как это было летом 2007 г., когда его доминанта стала одной из основных причин аномально малой ледовитости в морях сибирского шельфа [16, 17].

Колебания *среднегодового суммарного речного стока* в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском ( $RivLES_y(-1)$  и  $RivLES_y(-2)$ ) с временным лагом один и два года определяют в среднем 8% общей дисперсии летней ледовитости (см. строки 6 и 7 табл. 2), что сопоставимо с ролью летних атмосферных процессов. Влияние расхода вод через Берингов пролив  $Be_y(-1)$  проявилось в сентябрьской ледовитости, и по рангу оно близко к влиянию речного стока (см. строку 8 табл. 2). Вклад *11-летней цикличности солнечных пятен*  $Sun(-1)$  оказался в августе несколько меньше вклада речного стока, но в сентябре роль 11-летней цикличности возросла (см. строку 9 табл. 2). Полученные результаты дают основание считать, что в межгодовой изменчивости ледовитости Восточно-Сибирского моря присутствуют парциальные колебания, сопряжённые с межгодовой изменчивостью солнечной активности.

### Заключение

Межгодовые изменения ледовитости представляют собой интегральный результат воздействия атмосферных, океанических, гидрологических процессов и влияния солнечной активности. Многомерный статистический анализ позволил разработать регрессионные модели, которые адекватно описывают межгодовые изменения летней площади льдов Восточно-

Сибирского моря и дают возможность оценить роль каждого гидрометеорологического фактора и 11-летней цикличности солнечной активности в изменении ледовитости. Установлено, что преобладающие факторы, влияющие на площадь льдов Восточно-Сибирского моря в августе и сентябре, — температура воздуха в весенне-летний период, Арктическое колебание в предвесенний период и средний годовой индекс  $AMO_y(-8)$ , который служит маркером положения фронтальной зоны Трансарктического дрейфа. Вклад в общую дисперсию режима атмосферной циркуляции, представленный индексами  $AD$  и  $PNA$ , речного стока, расхода вод через Берингов пролив и солнечной активности оказался в пределах 5–10% каждый. Несмотря на относительно небольшой вклад солнечной активности в общую дисперсию изменчивости летней ледовитости, её целесообразно, как и влияние расхода вод через Берингов пролив и стока рек, сохранять в статистических моделях межгодовой изменчивости летней ледовитости Восточно-Сибирского моря.

Полученные статистические оценки и сопоставление графиков фактических межгодовых изменений ледовитости Восточно-Сибирского моря с рассчитанными по уравнениям на зависимом и независимом рядах предикторов позволяют говорить о том, что статистические уравнения (1) и (2) можно использовать в качестве диагностических моделей межгодовых изменений площади льдов. Авторский подход к описанию долгопериодных изменений ледовитости позволит вести разработку методов сверхдолгосрочных прогнозов межгодовых изменений площади льдов.

**Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта — RFMEFI61617X0076).

**Acknowledgments.** This work was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (the unique identifier of the project — RFMEFI61617X0076).

### Литература

1. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Научные исследования в Арктике: Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 135 с.

### References

1. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolyanitskiy V.M. Nauchnyye issledovaniya v Arktike: T. 2. Klimaticheskiye izmeneniya ledyanogo pokrova Evraziyskogo shelfa. Scientific studies in Arctic: V. 2.

2. Герман Дж.Р., Голдберг Р.А. Солнце, погода и климат. Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 319 с.
3. Визе В.Ю. Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей // Тр. ААНИИ. 1944. Т. 190. 273 с.
4. Санцевич Т.И. К методике долгосрочного гидрометеорологического прогноза для Арктики // Тр. ААНИИ. 1970. Т. 292. С. 49–86.
5. Карклин В.П., Ковалев Е.Г. Влияние солнечной активности на формирование крупных аномалий ледовитости арктических морей // Тр. ААНИИ. 1994. Т. 432. С. 28–35.
6. Егоров А.Г. Солнечный цикл и многолетние изменения средней тропосферы Арктики в зимний период // ДАН. 2014. Т. 459. № 1. С. 112–117.
7. Prowse T.D., Flegg P.O. Arctic river flow: a review of contributing areas // The freshwater budget of the Arctic Ocean. Ed. E.L. Lewis. NATO Science Series, 2. Environmental Security. 2000. V. 70. P. 269–280.
8. Атлас Арктики. М.: изд. ААНИИ и ГУГК, 1985. 204 с.
9. Шнайхер А.О., Беляков Л.Н., Измайлов В.В. К вопросу о влиянии тихоокеанских вод на гидрологический режим притихоокеанской части Арктического бассейна // Проблемы Арктики и Антарктики. 1970. Вып. 34. С. 20–29.
10. Электронный ресурс: <http://www.aari.ru/>.
11. Carmack E.C., Macdonald R.W., Perkin R.G., McLaughlin F.A., Pearson R.J. Evidence for warming of Atlantic water in the southern Canadian Basin of the Arctic Ocean: Results from the Larsen-93 expedition // Geophys. Research Letters. 1995. V. 22. P. 1061–1064.
12. Электронный ресурс: [https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN\\_m\\_tot\\_V2.0.txt](https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN_m_tot_V2.0.txt).
13. Абдусаматов Х.И. Солнце диктует климат Земли. СПб.: Логос, 2009. 197 с.
14. Электронный ресурс: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>
15. Janout M.Y., Aksenov J., Hölemann B., Rabe U., Schauer I., Polyakov S., Bacon A., Coward M., Karcher Y., Lenn D., Kassens H., Timokhov L. Kara Sea freshwater transport through Vilkitsky Strait: Variability, forcing, and further pathways toward the western Arctic Ocean from a model and observations // Journ. of Geophys. Research: Oceans. 2015. V. 120. № 7. P. 4925–4944. doi: 10.1002/2014JC010635.
16. Overland J.E., Wang M. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice // Tellus. Ser. A. 2010. V. 62. P. 1–9. doi: 10.1111/j.1600-0870.2009.00421.x.
17. Дмитриев А.А. О причинах возникновения природного феномена в Арктике летом 2007 г. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып. 77. С. 115–127.
- Climate changes of ice cover of Eurasian Shelf seas. St. Petersburg: Nauka, 2007: 135 p. [In Russian].
2. Herman J.R., Golsberg R.A. *Solnze, pogoda i klimat*. Sun, Weather, and Climate. Leningrad: Hydrometizdat, 1981: 319 p. [In Russian].
3. Vize V.Yu. The basics of long-term ice forecasts for the Arctic seas. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. Proc. of AARI. 1944, 190: 273 p. [In Russian].
4. Santsevich T.I. To a technique of the long-term hydrometeorological forecast for the Arctic. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. Proc. of AARI. 1970, 292: 49–86.
5. Karklin V.P., Kovalev E.G. The influence of solar activity on the formation of large anomalies in the ice cover of the Arctic seas. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. Proc. of AARI. 1994, 432: 28–35 [In Russian].
6. Egorov A.G. Solar cycle and long-term changes of the middle troposphere of the Arctic in the winter period. *Doklady Akademii Nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 2014, 459 (1): 112–117 [In Russian].
7. Prowse T.D., Flegg P.O. Arctic river flow: a review of contributing areas. In The freshwater budget of the Arctic Ocean. Ed. E.L. Lewis. NATO Science Series, 2. Environmental Security, 2000, 70: 269–280.
8. *Atlas Arktiki*. Atlas of the Arctic. Moscow: Arctic and Antarctic Research Institute and Central Directorate for Geodesy and Cartography, 1985: 204 p. [In Russian].
9. Shpaykher A.O., Belyakov L.N., Izmailov V.V. On the impact of Pacific waters on the hydrological regime of the near-Pacific part of the Arctic basin. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 1970, 34: 20–29. [In Russian].
10. <http://www.aari.ru/>.
11. Carmack E.C., Macdonald R.W., Perkin R.G., McLaughlin F.A., Pearson R.J. Evidence for warming of Atlantic water in the southern Canadian Basin of the Arctic Ocean: Results from the Larsen-93 expedition. *Geophys. Research Letters*. 1995, 22: 1061–1064.
12. [https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN\\_m\\_tot\\_V2.0.txt](https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN_m_tot_V2.0.txt).
13. *Abdusamatov H.I. Solnze diktuet klimat Zemli*. The sun dictates the climate of the Earth. St. Petersburg: The publishing house «Logos», 2009: 197 p. [In Russian].
14. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>.
15. Janout M.Y., Aksenov J., Hölemann B., Rabe U., Schauer I., Polyakov S., Bacon A., Coward M., Karcher Y., Lenn D., Kassens H., Timokhov L. Kara Sea freshwater transport through Vilkitsky Strait: Variability, forcing, and further pathways toward the western Arctic Ocean from a model and observations. *Journ. of Geophys. Research: Oceans*. 2015, 120 (7): 4925–4944. doi: 10.1002/2014JC010635.
16. Overland J.E., Wang M. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus. Ser. A*. 2010, 62: 1–9. doi: 10.1111/j.1600-0870.2009.00421.x.
17. Dmitriev A.A. On the reasons of occurrence of a natural phenomenon in the Arctic in the summer of 2007. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2007, 77: 115–127. [In Russian].