

**Причины и особенности долговременной изменчивости ледовитости Баренцева моря**© 2019 г. С.Б. Крашенинникова<sup>1\*</sup>, М.А. Крашенинникова<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия;<sup>2</sup>Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

\*svetlanabk@mail.ru

**Causes and features of long-term variability of the ice extent in the Barents Sea**S.B. Krasheninnikova<sup>1\*</sup>, M.A. Krasheninnikova<sup>2</sup><sup>1</sup>The A.O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia;<sup>2</sup>Institute of Natural-technical Systems, Sevastopol, Russia

\*svetlanabk@mail.ru

Received May 25, 2018 / Revised October 15, 2018 / Accepted December 21, 2018

**Keywords:** AMO, Barents Sea, NAO, salinity, sea ice cover, temperature.**Summary**

Based on the spectral analysis of a number of estimates of the ice extent of the Barents Sea, obtained from instrumental observational data for 1900–2014, and for the selected CMIP5 project models (MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR and GFDL-CM3) for 1900–2005, a typical period of ~60-year inter-annual variability associated with the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) in conditions of a general significant decrease in the ice extent of the Barents Sea, which, according to observations and model calculations, was 20 and 15%, respectively, which confirms global warming. The maximum contribution to the total dispersion of temperature, ice cover of the Barents Sea, AMO, introduces variability with periods of more than 20 years and trends that are 47, 20, 51% and 33, 57, 30%, respectively. On the basis of the cross correlation analysis, significant links have been established between the ice extent of the Barents Sea, AMO, and North Atlantic Oscillation (NAO) for the period 1900–2014. A significant negative connection ( $R = -0.8$ ) of ice cover and Atlantic multi-decadal oscillations was revealed at periods of more than 20 years with a shift of 1–2 years; NAO and ice cover ( $R = -0.6$ ) with a shift of 1–2 years for periods of 10–20 years; AMO and NAO ( $R = -0.4 \div -0.5$ ) with a 3-year shift with AMO leading at 3–4, 6–8 and more than 20 years. The periods of the ice cover growth are specified: 1950–1980 and the reduction of the ice cover: the 1920–1950 and the 1980–2010 in the Barents Sea. Intensification of the transfer of warm waters from the North Atlantic to the Arctic basin, under the atmospheric influence caused by the NAO, accompanied by the growth of AMO leads to an increase in temperature, salinity and a decrease of ice cover in the Barents Sea. During periods of ice cover growth, opposite tendencies appear. The decrease in the ice cover area of the entire Northern Hemisphere by  $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$  since the mid-1980s. to the beginning of the 2010, identified in the present work on NOAA satellite data, confirms the results obtained on the change in ice extent in the Barents Sea.

**Citation:** Krasheninnikova S.B., Krasheninnikova M.A. Causes and features of the long-term variability of the ice extent of the Barents Sea. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (1): 112–122. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-112-122.

Поступила 25 мая 2018 г. / После доработки 15 октября 2018 г. / Принята к печати 21 декабря 2018 г.

**Ключевые слова:** AMO, Баренцево море, ледовитость, САК, солёность, температура.

На основе анализа данных инструментальных наблюдений за 1900–2014 гг. и модельных расчётов проекта CMIP5 установлена долговременная изменчивость ледовитости Баренцева моря с характерным периодом около 60 лет, соответствующим Атлантической мультидекадной осцилляции. На основе сдвигового взаимного корреляционного анализа выявлена связь изменений температуры и ледовитости Баренцева моря с изменчивостью интенсивности атмосферной и океанической циркуляции в Северной Атлантике.

**Введение**

Баренцево море занимает ключевое положение в Российской Арктике [1–3]. Здесь сосредоточены большие запасы нефти и газа. Кроме того, Баренцево море – один из богатейших промысловых районов Мирового океана. Его биопродук-

тивность зависит от процессов, происходящих в системе атмосфера–гидросфера–криосфера. Характерная особенность ледового режима Баренцева моря – существенная межгодовая и сезонная изменчивость его ледовитости [1, 4–7], которая определяется несколькими процессами: адвективным переносом тепла в океане, особенно тёплыми

струями системы Гольфстрим–Североатлантическое течение [8–10]; поверхностной циркуляцией вод и дрейфом льдов Арктического бассейна [6]; крупномасштабным атмосферным воздействием Северной Атлантики, т.е. Североатлантическим колебанием (САК) и Атлантической мультидекадной осцилляцией (АМО) [10–14].

В работе [15] анализировались среднесезонные оценки прихода и расхода тепла в южной части Баренцева моря. Показано, что приход тепла за счёт адвекции течениями, солнечной радиации, теплообмена с атмосферой составляет 56, 42 и 2% соответственно. Из-за поступления в Баренцево море тёплых атлантических вод оно не замерзает в течение всего года. Ледовитость существенно влияет на все звенья морских экосистем: от планктона до высших консументов [16]. Вместе с тем ледовые условия иногда ограничивают акваторию для промышленного лова рыбы. В связи с этим особый интерес вызывает исследование особенностей формирования и развития аномалий ледовых характеристик различного временного масштаба и факторов, способствующих возникновению этих особенностей.

Современные массивы данных инструментальных наблюдений (авиационных и спутниковых, наблюдений с дрейфующих льдов и судов разного ледового класса), накопленных за многие годы, позволяют наиболее точно оценить низкочастотную изменчивость ледяного покрова Баренцева моря [1, 3–5, 17]. В последние десятилетия для анализа и прогноза изменчивости ледово-термических характеристик морей мировыми климатическими центрами разработаны численные глобальные модели [18–22], учитывающие многие факторы, определяющие тепловой режим планеты [23]. Недавно завершившийся международный проект CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) по сравнению последних версий национальных совместных моделей системы океан–атмосфера даёт количественную основу для отчёта международной группы экспертов по изменению климата (IPCC) [18].

В последней фазе проекта пространственно-временное разрешение моделей было повышено, увеличено также число используемых глобальных циркуляционных моделей, изменены сценарии для расчёта климата будущего [24]. В работах [14, 25, 26] показано, что модели CMIP5 лучше воспроизводят климатические ха-

рактеристики Арктического бассейна по сравнению с моделями предыдущего поколения. Всё это показывает необходимость дополнительного сравнения результатов новых модельных расчётов с данными уже проведённых инструментальных наблюдений в исследуемых районах.

Цель настоящей работы – установить особенности и причины долговременной изменчивости ледовых характеристик Баренцева моря на основе использования длительных рядов данных инструментальных наблюдений и модельных расчётов, полученных в рамках проекта CMIP5.

### Исходные данные

Ледовитость определяется как отношение площади моря, покрытой льдом, к площади моря, свободной ото льда [5]. Для оценок возможных изменений ледовитости в Арктике анализировались результаты расчётов с ансамблем глобальных климатических моделей в рамках международного проекта CMIP5 при сценариях естественных и антропогенных воздействий RCP. В частности, использовался сценарий RCP4.5 для XXI в. В работе сравнивались результаты расчётов ледовитости (%) Баренцева моря по семи моделям (GFDL-CM3, IPSL-CM5B-LR, MPI-ESM-MR, INMCM4, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR и HadGEM2-AO) проекта CMIP5 [18] (исторический массив) за 1900–2005 гг. с данными контактных наблюдений за 1900–2014 гг., подробно описанными в работах [1, 4, 5]. Для установления максимального совпадения между характеристиками ледовитости по данным контактных наблюдений и модельных расчётов оценивались коэффициенты корреляций.

В настоящей работе анализировались термohалинные характеристики на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море. Этот разрез находится в области распространения тёплых вод системы Нордкапского течения и опреснённых вод Мурманского прибрежного течения. Глубина здесь варьирует в пределах 150–350 м и в среднем составляет 250 м. Данные этого разреза служат исходным материалом для общей и промысловой океанологии. В работе [2] показано, что имеющийся ряд данных о температуре распределён неравномерно по времени: периоды, когда наблюдения проводились крайне

редко или вообще не проводились, чередуются с периодами регулярных наблюдений. В результате весь 113-летний ряд наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» можно разбить на несколько периодов: 1900–1906 гг. (7 лет); 1921–1941 гг. (21 год); 1945–2014 гг. (69 лет). Для анализа использовались регулярные по времени среднемесячные данные о температуре воды в слое 0–200 м, предоставленные в свободном доступе за 1951–2014 гг. Полярным научно-исследовательским институтом, г. Мурманск [27].

Для оценки межгодовой изменчивости ледяного покрова Северного полушария использовались ежесуточные данные спутниковых наблюдений NOAA за 1978–2013 гг. [28], по которым сначала находили среднемесячные, а затем среднегодовые величины. В качестве характеристики Североатлантического колебания использовался его индекс САК за период 1900–2014 гг. [29], а Атлантической мультideкадной осцилляции – индекс АМО за 1900–2017 гг. [30]. Для получения достоверных оценок низкочастотной изменчивости этих характеристик оценена значимость выявленных тенденций.

С целью оценки вкладов различных колебаний в суммарную изменчивость авторами проводился стандартный статистический анализ. С помощью преобразования Фурье ряды ледовитости, температуры и солёности Баренцева моря, а также АМО раскладывались в спектр. Далее определяли периоды типичной изменчивости указанных характеристик. Затем низкочастотными, полосно-пропускающими и высокочастотными фильтрами были выделены соответствующие колебания с периодами более 20 лет, 10–20, 6–8, 3–4 года и оценён вклад каждого компонента в суммарную дисперсию. Для анализа связей между ледовитостью и температурой Баренцева моря, индексами САК и АМО, также после предварительной их фильтрации, выполнен взаимный кросскорреляционный сдвиговый анализ соответствующих исходных рядов.

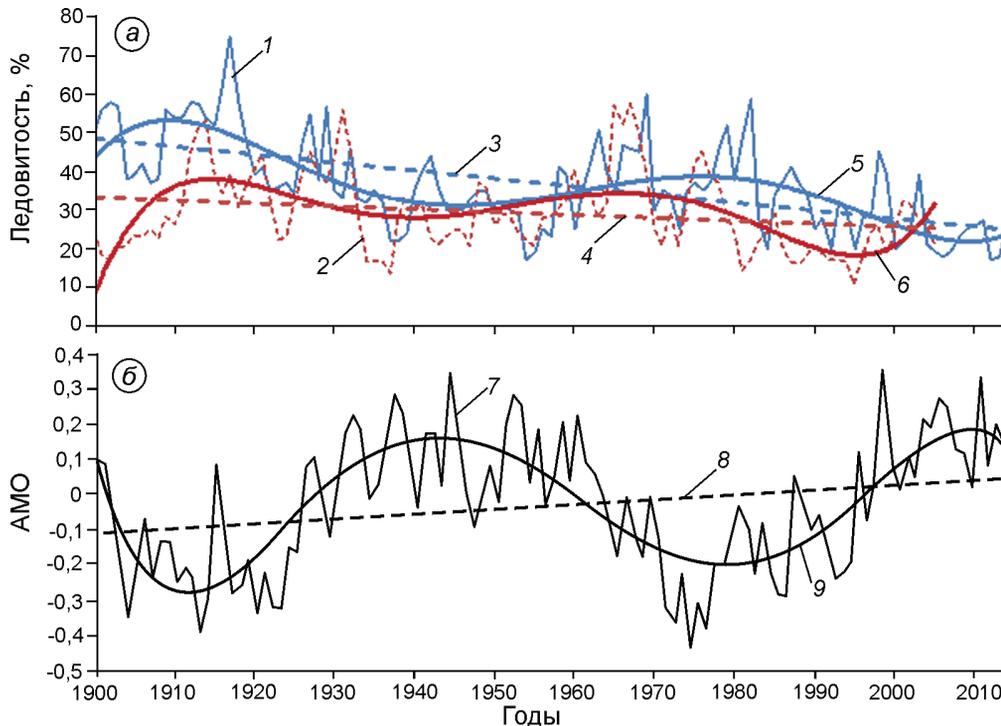
### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 сравнивается межгодовая изменчивость ледовитости Баренцева моря, полученная по данным инструментальных наблюдений за 1900–2014 гг. и расчётов по модели GFDL-CM3 за 1900–2005 гг., а также индекса АМО за

1900–2014 гг. и их линейных и полиномиальных трендов пятого порядка. Полученные характеристики по данным инструментальных наблюдений и модельных расчётов GFDL-CM3 имеют недостаточно хорошее совпадение (см. рис. 1, а). Коэффициент корреляции между ними  $R = 0,4$ . По моделям MPI-ESM-LR и MPI-ESM-MR  $R = 0,3 \div 0,4$ . Остальные модели дают более низкие значения коэффициентов корреляции. Анализ полиномиальных трендов пятого порядка также демонстрирует расхождение в характеристиках. Например, согласно модельным расчётам, максимум ледовитости приходится приблизительно на 1970-е годы, в то время как инструментальные данные показывают максимальное значение в начале 1980-х годов. Модельные оценки отображают увеличение ледовитости в начале 2000-х годов, а реальные данные – уменьшение ледовитости до 2012 г. с последующим увеличением до 2014 г. При этом периоды 58 лет и 53 года и амплитуды 10 и 8% колебаний ледовитости Баренцева моря, выделенные с помощью гармонического анализа по данным инструментальных и модельных наблюдений соответственно, достаточно хорошо согласуются между собой.

Полученные среднегодовые оценки ледовитости Баренцева моря за одинаковый период 1900–2005 г. по данным инструментальных наблюдений и модельных расчётов имеют один порядок и равны  $37 \pm 11\%$  и  $29 \pm 10\%$  соответственно. Выделенные долговременные тенденции уменьшения ледовитости, значимые на 95%-м доверительном уровне, полученные по данным инструментальных наблюдений, согласуются с приведёнными модельными расчётами. Таким образом, выбранные модели CMIP5 (GFDL-CM3, MPI-ESM-LR и MPI-ESM-MR) могут использоваться для анализа внутривековой тенденции ледовитости Баренцева моря, хотя они не очень хорошо воспроизводят колебания межгодовых и междекадных масштабов из-за ограниченности длины ряда и отсутствия корректировки сдвига фаз в моделях.

В настоящей работе на основе спектрального анализа рядов данных о ледовитости и температуре на разрезе «Кольский меридиан» Баренцева моря установлено, что в изменчивости этих характеристик присутствуют квазипериодические составляющие: более 20 лет, 10–11 лет, 6–8 лет,



**Рис. 1.** *a* – Межгодовая изменчивость ледовитости Баренцева моря: 1 – по данным инструментальных наблюдений за 1900–2014 гг.; 2 – по модели GFDL-CM3 за 1900–2005 гг.; 3, 4 – линейные тренды; 5, 6 – полиномиальные тренды пятого порядка; *б* – 7 – индекс АМО за 1900–2014 гг.; 8 – линейный тренд; 9 – полиномиальный тренд пятого порядка

**Fig. 1.** *a* – Interannual variability of ice cover anomalies in the Barents Sea: 1 – instrumental observations for 1900–2014; 2 – on the model GFDL-CM3 for 1900–2005; 3, 4 – linear trends; 5, 6 – polynomial trends of the 5th order; *б* – 7 – the AMO index for 1900–2014; 8 – linear trend; 9 – polynomial trend of the 5th order

Таблица 1. Оценка вклада различных компонент в суммарную дисперсию, %

Характеристика	Периоды, годы					Суммарный вклад
	3–4	6–8	10–20	более 20	тренд	
Температура Баренцева моря в слое 0–200 м	9	6	4	47	33	91
Ледовитость Баренцева моря по наблюдениям	3	5	14	20	57	99
Ледовитость Баренцева моря по модели GFDL-CM3	5	2	15	32	45	99
САК	2	4	6	17	70	99
АМО	10	3	5	51	30	99

3–4 года. Аналогичные периоды изменчивости выделяются и по другим гидрометеорологическим характеристикам в Северной Атлантике, в частности по индексам САК и АМО (табл. 1). Однако на основании периодограмм-анализа показано, что наибольший вклад изменчивости в суммарную дисперсию температуры на разрезе «Кольский меридиан», ледовитость Баренцева моря, АМО, САК вносят долгопериодные компоненты с периодами более 20 лет и линейные тренды, которые составляют 47, 20, 51, 17% и 33,

57, 30, 70% соответственно. В работе [6] обсуждаемый вклад ледовитости оценивается в 56%.

В западных морях (Гренландское, Баренцево и Карское) действительно преобладают низкие частоты (более 20 лет), в то время как в восточных морях (море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское) – высокие частоты (2–3 года и 8–12 лет) [6]. Анализ индекса САК за более короткий период (1950–2004 гг.), чем 1900–2014 гг. (см. табл. 1), показал, что в изменчивости САК доминируют высокочастот-

Таблица 2. Коэффициенты корреляции  $R$  между отдельными параметрами при сдвиговом кросскорреляционном анализе, значимые на 95%-м доверительном уровне\*

Изменчивость характеристик		Периоды, годы				Исходный ряд
лидирует	отстаёт	3–4	6–8	10–20	более 20	
Ледовитость Баренцева моря	АМО	0,4(1)	–	0,4(1)	–0,9(2)	–0,4
АМО	Ледовитость Баренцева моря	–	–	0,4(1)	–0,8(1)	–0,4
Ледовитость Баренцева моря	САК	–	0,4(3)	–0,6(1)	–	–
САК	Ледовитость Баренцева моря	–	–0,4(1)	–0,6(1–2)	–	–
Ледовитость Баренцева моря	Температура Баренцева моря	0,6(2)	–0,5(1)	–0,6(1)	–0,7(1–2)	–0,6
Температура Баренцева моря	Ледовитость Баренцева моря	0,6(2)	0,6(3)	0,6(3)	–0,7(1)	–0,6
АМО	САК	0,4(3)	–0,4(3)	–	–0,5(3)	–
САК	АМО	–	–	–0,4(1)	–	–

\*Цифрами обозначены значения  $R$ ; в скобках указана величина временного сдвига (годы); для исходных рядов (без фильтрации) представлена прямая взаимная корреляция без сдвига. Прочерк – нет данных.

ные компоненты – 6–8 лет и 3–4 года, их вклад в суммарную изменчивость равен 48 и 28% соответственно; эти оценки согласуются с результатами работ [12, 31]. Доминирование низкочастотного масштаба в изменчивости ряда САК за длительный период (115 лет) в настоящей работе (см. табл. 1) подтверждает, что мультидекадная мода САК соответствует АМО.

На основе анализа многолетних рядов данных контактных наблюдений 1900–2014 гг. и модельных расчётов проекта CMIP5 за период 1900–2005 гг. (см. рис. 1, а) установлено, что в изменчивости ледовитости Баренцева моря доминирует период приблизительно 60 лет, связанный с АМО. Наличие такого цикла как основного климатообразующего колебания в Арктической зоне в XX в. [32] подтверждается также вейвлет-спектром аномалий среднегодовой температуры воздуха, из которых был удалён линейный тренд в работе [6]. Однако к этой уточнённой оценке нужно относиться с осторожностью, так как для статистически значимого определения «внутривековой» изменчивости данные наблюдений должны охватывать хотя бы два периода изменчивости. Поэтому непрерывный мониторинг ледовитости Баренцева моря остаётся одной из важных задач.

Авторы провели кросскорреляционный анализ связей между соответствующими характеристиками (ледовитостью, температурой Баренцева моря, САК и АМО) на выделенных масштабах изменчивости, как прямых, так и с временными сдвигами (1–3 года), значимыми на 95%-м доверительном уровне, результаты ко-

торого приведены в табл. 2. Максимальные корреляции обнаружены при сдвиге два года между ледовитостью и АМО ( $R = -0,9$ ) на периодах более 20 лет. Между ледовитостью и температурой Баренцева моря также установлена отрицательная связь ( $R = -0,7$ ), которая проявляется со сдвигом 1–2 года при лидировании температуры на периодах 10–20 лет и более 20 лет. Между САК и ледовитостью отмечена отрицательная корреляционная связь ( $R = -0,6$ ) со сдвигом 1–2 года при лидировании САК, отрицательная ( $R = -0,4$ ) со сдвигом один год на периоде 10–20 лет и положительная ( $R = 0,4$ ) со сдвигом три года на периоде 6–8 лет при лидировании ледовитости. Имеются значимые связи ( $R = 0,8$ ) между САК и ледовитостью при лидировании ледовитости на периодах более 20 лет при больших временных сдвигах (семь лет), однако в настоящей работе они не анализировались. Взаимный корреляционный анализ АМО и САК показал, что эти характеристики имеют отрицательную связь ( $R = -0,4 \div -0,5$ ) на периодах 3–4, 6–8 и более 20 лет со сдвигом три года при лидировании АМО. Последний результат согласуется с результатами работы [33], в которой показано, что для положительной (отрицательной) фазы АМО характерно сочетание отрицательных (положительных) значений индекса САК.

При увеличении АМО в 1920–50-е и в 1980–2010-е годы (см. рис. 1, б) ледовитость Баренцева моря с запаздыванием приблизительно около двух лет уменьшается (см. рис. 1, а), что связано с интенсификацией атмосферной циркуляции, которая сопровождается усилением западных и

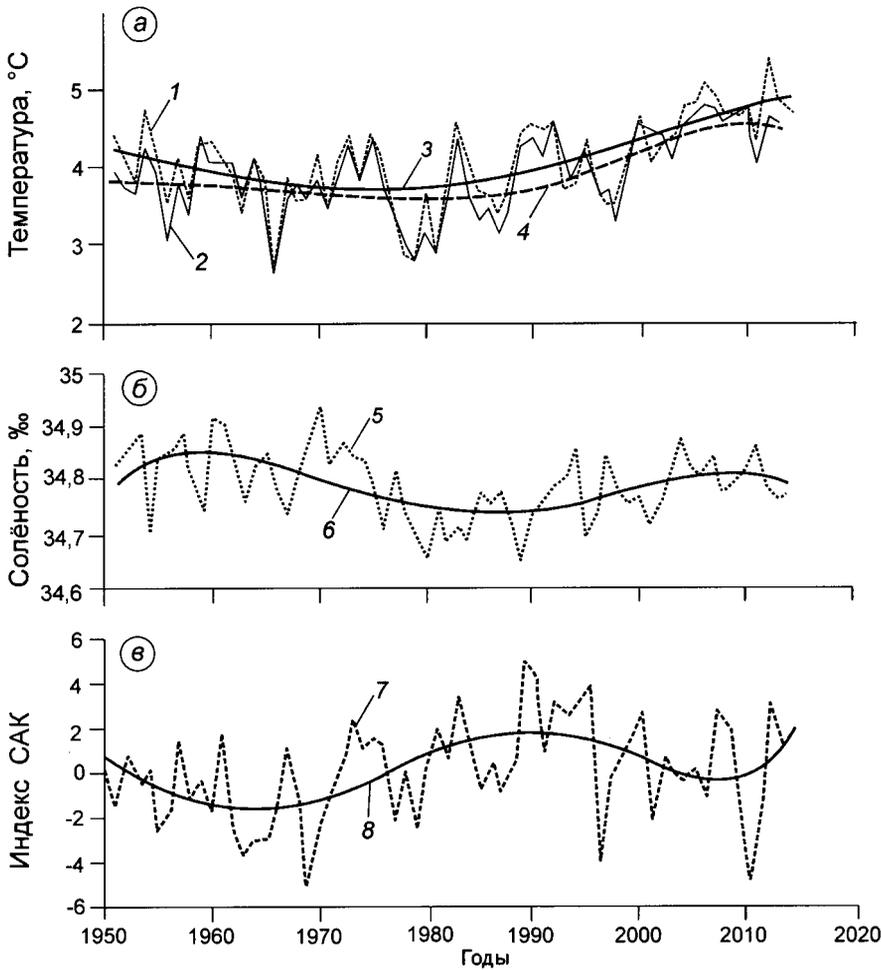
юго-западных ветров над Северной Атлантикой и Норвежским морем и увеличением притока тёплых Североатлантических вод в Арктический бассейн. При уменьшении АМО в 1950–80-е годы ледовитость Баренцева моря увеличивалась, что сопровождалось ослаблением атмосферной и океанической циркуляции Североатлантического региона. Аналогичные периоды сокращения и разрастания льда до 1999 г. выделены по всему Арктическому бассейну [17] и до 2005 г. для Гренландского, Баренцева и Карского морей при рассмотрении характеристик колебаний суммарной площади, занятой льдом в этих морях [6].

Как отмечено в работе [3], на основе сравнительного анализа данных мониторинга морских льдов с помощью попутных измерений с борта ледоколов и других судов в 1977, 1987, 2000 гг. площадь многолетних льдов сократилась в 2–3 раза, а толщина льда во всём Арктическом бассейне уменьшилась на 23%. Полученные в настоящей работе результаты совпадают с результатами модельных расчётов [20] за 1950–2005 гг. и фоновым прогнозом по ледовитости морей Северного Ледовитого океана на 2006–2090 гг. В работе [23] показано, что ледовитость в северных морях с 2010 г. увеличивается и это будет продолжаться вплоть до 2030 г., причём это характерно как для восточных, так и для западных морей Северного Ледовитого океана. Отмечается также, что для западных морей (к которым относится и Баренцево море) эти изменения выражены особенно резко. Анализ результатов численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы в работе [21] позволил установить, что потепление в первой половине XX в. в зимний период должно было сопровождаться значительной отрицательной аномалией площади распространения арктических морских льдов. Полученные результаты показывают существенную роль естественных долгопериодных колебаний климата в современных изменениях площади морских льдов. Это связано с изменением атмосферной циркуляции и температуры воздуха, толщины ледяного покрова, положительными и отрицательными связями с альбедо поверхности, а главное – с поступлением тёплых вод в Арктику из Северной Атлантики [34].

На площадь ледяного покрова в Баренцевом море влияет и Североатлантическое колебание – главная мода зимней межгодовой из-

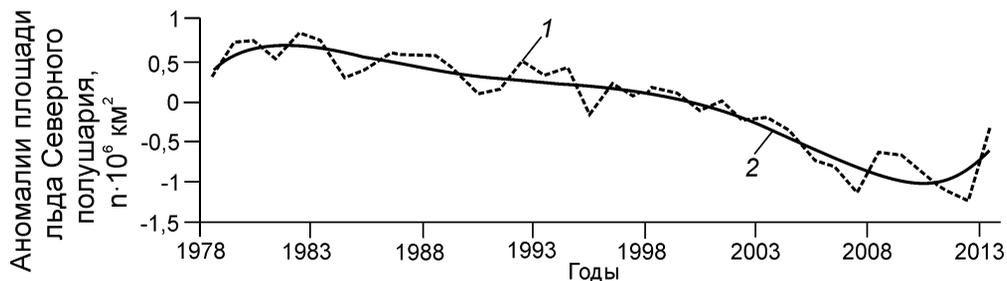
менчивости крупномасштабной циркуляции атмосферы во внетропических широтах Северного полушария [14, 35]. САК также определяет перенос атлантических вод в Северный Ледовитый океан [36]. На рис. 2 показана межгодовая изменчивость температуры, солёности Баренцева моря и индекса САК. Увеличение индекса САК в 1960–90-е годы, характеризующееся усилением зональной циркуляции атмосферы, сопровождается интенсификацией и смещением на север, но с некоторым запаздыванием, начиная с конца 1970-х до середины 2010-х годов, Северного субполярного фронта в Северной Атлантике [11, 12]. Это приводит к увеличению притока тёплых вод из Северной Атлантики в Арктику и, как следствие, к увеличению температуры, солёности и уменьшению ледовитости Баренцева моря (см. рис. 1, а и рис. 2). Данные о температуре воды в Баренцевом море в слое 50–200 м, в котором проходит поток атлантической воды через разрез по «Кольскому меридиану», относятся к репрезентативным показателям интенсивности океанического притока тепла из Атлантики в Баренцево море [2]. Графики температуры и полиномиальные тренды пятого порядка в слоях 0–200 и 50–200 м практически совпадают (см. рис. 2, а). Распространяясь по акватории Баренцева моря, тёплая и солёная вода ограничивает разрастание морского ледяного покрова.

Анализ значимого на 95%-м доверительном уровне линейного тренда по данным инструментальных наблюдений показал, что ледовитость Баренцева моря уменьшилась за 1900–2014 гг. на 20%. Отрицательную долговременную тенденцию ледовитости за 1900–2005 гг. подтверждают результаты, полученные в настоящей работе с помощью выбранных современных глобальных климатических моделей в рамках проекта CMIP5, материалов исследований [14, 21, 25, 29, 37] и данных инструментальных наблюдений [1, 6, 17, 23, 38]. Механизм усиления потепления в Баренцевом море и во всём Атлантическом секторе Арктики описан в работах [34, 39], авторы которых подчёркивают важность влияния увеличения переноса океанического тепла из Северной Атлантики вместе с возможными крупномасштабными изменениями атмосферной циркуляции. Наиболее значительные линейные тренды ледовитости отмечаются в западных морях (Гренландское, Баренцево, Карское),



**Рис. 2.** *a* – Межгодовая изменчивость температуры: 1 – в слое 0–200 м; 2 – в слое 50–200 м; 3, 4 – полиномиальные тренды пятого порядка; *б* – межгодовая изменчивость солёности: 5 – в слое 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан»; 6 – полиномиальный тренд пятого порядка; *в* – 7 – индекс САК; 8 – полиномиальный тренд пятого порядка

**Fig. 2.** *a* – interannual variability of temperature: 1 – in the 0–200 m layer; 2 – in the 50–200 m layer; 3, 4 – polynomial trends of the 5th order; *б* – interannual variability of salinity: 5 – in the 0–200 m layer on « the Kola meridian»; 6 – polynomial trend of the 5th order; *в* – 7 – NAO index; 8 – polynomial trend of the 5th order



**Рис. 3.** Межгодовая изменчивость аномалий площади, занимаемой ледяным покровом Северного полушария: 1 – межгодовые аномалии площади, занимаемой ледяным покровом Северного полушария по данным спутниковых наблюдений NOAA за 1978–2013 гг.; 2 – полиномиальные тренды пятого порядка

**Fig. 3.** Interannual variability of anomalies of the area occupied by the ice cover of the Northern Hemisphere according to the satellite observations NOAA for 1978–2013; 2 – polynomial trends of the 5th order

где вклад таких изменений в дисперсию межгодовой изменчивости ледовитости составил более 30%; в восточных морях он равен всего 8% [6]. В работе [39] вклад в изменчивость ледовитости атлантического сектора Арктики линейного тренда оценивается в 48%.

Оценки площади ледяного покрова всего Северного полушария, полученные в настоящей работе по спутниковым данным NOAA за 1978–2013 гг., также показывают её уменьшение в среднем на  $1,5 \times 10^6 \text{ км}^2$  с 1980-х до начала 2010-х годов (рис. 3). По данным расчётов моделей про-

екта CMIP5 в работе [14] показано, что площадь ледяного покрова всей Арктики уменьшилась на  $2 \times 10^6$  км<sup>2</sup> за период 1970–2000 гг. Однако с 2012 г. наблюдается незначительный рост ледяного покрова Северного полушария (см. рис. 3), что согласуется с результатами работы [17]. Сравнительный анализ полиномиальных трендов (см. рис. 1 а, б) показывает, что отмеченное увеличение ледовитости с 2012 г. проявляется и в Баренцевом море, и это сопровождается спадом АМО с 2010 г.

### Заключение

На основе анализа большого массива данных (1900–2014 гг.) инструментальных наблюдений за ледовитостью Баренцева моря и результатов расчёта по выбранным трём моделям проекта CMIP5 (GFDL-CM3, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR) за 1900–2005 гг. проанализирована её межгодовая и междекадная изменчивости и линейные тренды. С помощью спектрального анализа рядов данных о температуре на разрезе «Кольский меридиан», ледовитости Баренцева моря и Атлантической мультideкадной осцилляции установлено, что в изменчивости этих характеристик присутствуют квазипериодические составляющие: более 20 лет, 10–11 лет, 6–8 лет, 3–4 года. Полученные оценки соответствующих вкладов в изменчивость ледовитости по данным контактных наблюдений и модели GFDL-CM3 достаточно хорошо совпадают, при этом максимальный вклад в изменчивость вносят периоды более 20 лет (20 и 32%) и тренды (57 и 45%).

Наибольшие вклады изменчивости в суммарную дисперсию температуры на разрезе «Кольский меридиан» и Атлантической мультideкадной осцилляции вносят долгопериодные составляющие с периодами более 20 лет после предварительного удаления тренда, равные 47 и 51% соответственно. На долю этих трендов при-

ходится 33 и 30% суммарной дисперсии. Уменьшение ледовитости Баренцева моря за период 1900–2014 гг. составило по данным наблюдений и модельных расчётов 20 и 15% соответственно, что подтверждает глобальное потепление.

Сокращение площади льда с середины 1920–50-х годов и в 1980–2010-е годы связано с увеличением АМО и интенсификацией переноса тёплых вод из Северной Атлантики в Арктический бассейн под влиянием атмосферного воздействия, обусловленного САК. Между САК и ледовитостью отмечена отрицательная корреляционная связь ( $R = -0,6$ ) со сдвигом 1–2 года на периодах 10–20 лет.

Периоды нарастания ледяного покрова в 1950–80-е годы сопровождаются противоположными тенденциями. При этом реакция ледовитости на изменения температуры поверхности Северной Атлантики происходит приблизительно с двухлетним запаздыванием ( $R = -0,7$ ). Установленное по спутниковым данным NOAA уменьшение площади ледяного покрова всего Северного полушария на  $1,5 \times 10^6$  км<sup>2</sup> с 1980-х до начала 2010-х годов подтверждает полученные результаты по изменению ледовитости Баренцева моря.

**Благодарности.** Исследования выполнены по теме государственного задания Института морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского РАН «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (AAAA-A18-118021490093-4).

**Acknowledgments.** The research was carried out on the theme of the state task of the Institute of Marine Biological Research. A.O. Kovalevsky RAS «Functional, metabolic and toxicological aspects of the existence of hydrobionts and their populations in biotopes with different physic-chemical regimes» (AAAA-A18-118021490093-4).

### Литература

1. Жичкин А.П. Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // Вест. Кольского науч. центра РАН. 2015. № 1 (20). С. 55–64.
2. Карсаков А.Л. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом

### References

1. Zhichkin A.P Dynamics of inter-annual and seasonal anomalies of ice-cover extent in the Barents and Kara Seas. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. Bull. of the Kola Science Center of the RAS. 2015, 1 (20): 55–64. [In Russian].
2. Karsakov A.L. *Okeanograficheskie issledovaniya na razreze «Kolskiy meridian» v Barentsevom more za period 1900–*

- море за период 1900–2008 гг. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2009. 139 с.
3. Фролов С.В., Федяков В.Е., Третьяков Ю.В., Клейн А.Э., Алексеев Г.В. Новые данные об изменении толщины льда в Арктическом бассейне // ДАН. 2009. Т. 425. № 1. С. 104–108.
  4. Воробьев В.Н., Косенко А.В., Смирнов Н.П. Многолетняя динамика ледового покрова морей западного сектора Арктики и ее связь с циркуляцией атмосферы и океана в Североатлантическом регионе // Изв. РГО. 2010. Т. 142. Вып. 6. С. 52–59.
  5. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л. Арктика. Морская хозяйственная деятельность в российской Арктике в условиях современных климатических изменений // Экология и экономика. 2012. № 1 (5). С. 26–37.
  6. 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.
  7. Миронов Е.У. Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: изд. ААНИИ, 2004. 320 с.
  8. Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 381–390.
  9. Bersh M., Yashayaev I., Koltermann K.P. Recent changes of the thermohaline circulation in the subpolar North Atlantic // Ocean Dynamics. 2007. V. 57. P. 223–235.
  10. Furevik T. Annual and interannual variability of Atlantic Water temperatures in the Norwegian and Barents seas: 1980–1996 // Deep Sea Research. 2001. Pt. I. 48. P. 383–404.
  11. Дворянин Г.С., Кубряков А.А., Сизов А.А., Станичный С.В., Шапиро Н.Б. Североатлантическое колебание – доминирующий фактор изменчивости циркуляционных океанических систем Северной Атлантики // ДАН. 2016. Т. 466. № 3. С. 345–349.
  12. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада ЛТД, 2013. 144 с.
  13. Сарафанов А.А., Соков А.В., Фалина А.С. Потепление и осолонение Лабрадорской водной массы и глубинных вод в Субполярной Северной Атлантике на 60° с.ш. в 1997–2006 гг. // Океанология. 2009. Т. 49. № 2. С. 209–221.
  14. Семенов В.А., Мартин Т., Беренс Р.К., Латиф М., Астафьева Е.С. Изменение площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей CMIP5 и CMIP3 // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107.
  - 2008 gg. Oceanographic studies on the Kola meridian section in the Barents Sea for the period 1900–2008. Murmansk: PINRO, 2009: 139 p. [In Russian].
  3. Frolov S.V., Fedyaev V.E., Tretyakov Yu.V., Kleyn A.E., Alekseev G.V. New data on change in ice thickness in the Arctic Ocean. *Doklady Akademii nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 2009, 425 (1): 104–108. [In Russian].
  4. Vorob'ev V.N., Kosenko A.V., Smirnov N.P. Multiyear dynamics of ice cover of the sea in the western sector of the Arctic and its relation to the circulation of the atmosphere and ocean in the North Atlantic region. *Izvestiya. RGO*. Proc. of the Russian Geographical Society. 2010, 142 (6): 52–59. [In Russian].
  5. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L. Marine economic activity in the Russian Arctic in the context of modern climate change. *Ekologiya i ekonomika*. Ecology and Economics. 2012, 1 (5): 26–37. [In Russian].
  6. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolyanitsky V.M. *Nauchnye issledovaniya v Arktike: T. 2. Klimaticheskie izmeneniya ledyanogo pokrova Evrazijskogo shelfa*. Scientific research in the Arctic. Climatic changes in the ice cover of the Eurasian shelf. T. 2. St.-Petersburg, Nauka, 2007: 135 p. [In Russian].
  7. Mironov E.U. *Ledovyye usloviya v Grenlandskom i Barentsevom moryakh i ikh dolgosrochnyi prognoz*. Ice conditions in the Greenland and Barents Seas and their long-term forecast. St.-Petersburg: AARI, 2004: 320 p. [In Russian].
  8. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V. The influence of the Atlantic on the warming and reduction of the Arctic sea ice cover. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 381–390. [In Russian].
  9. Bersh M., Yashayaev I., Koltermann K. P. Recent changes of the thermohaline circulation in the subpolar North Atlantic. *Ocean Dynamics*. 2007, 57: 223–235.
  10. Furevik T. Annual and interannual variability of Atlantic Water temperatures in the Norwegian and Barents seas: 1980–1996. *Deep-Sea Research*. 2001, Pt. I. 48: 383–404.
  11. Dvoryaninov G.S., Kubryakov A.A., Sizov A.A., Stanichnyy S.V., Shapiro N.B. The North Atlantic Oscillation is the dominant factor in the variability of the circulating ocean systems of the North Atlantic. *Doklady Akademii nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 2016, 466 (3): 345–349. [In Russian].
  12. Nesterov E.S. *Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean*. North Atlantic Oscillation: Atmosphere and Ocean. Moscow: Triada LTD, 2013: 144 p. [In Russian].
  13. Sarafanov A.A., Sokov A.V., Falina A.C. Warming and salinity of the Labrador water mass and deep waters in the Subpolar North Atlantic by 60° N in 1997–2006. *Okeanologiya*. Oceanology. 2009, 49 (2): 209–221. [In Russian].
  14. Semenov V.A., Martin T., Berens R.K., Latif M., Astaf'eva E.S. The change in the area of Arctic sea ice in ensembles of climate models CMIP5 and CMIP3. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (1): 77–107. [In Russian].
  15. Averkiev A.S., Gustoev D.V., Karpova I.P., Seryakov E.I. *Issledovanie i dolgosrochnoe prognozirovanie teplovykh protsessov na*

15. *Аверкиев А.С., Густоев Д.В., Карпова И.П., Сержаков Е.И.* Исследование и долгосрочное прогнозирование тепловых процессов на разрезе «Кольский меридиан» // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан». Мурманск: изд. ПИНРО, 2005. С. 15–31.
16. *Денисов В.В.* Эколого-географические основы устойчивого природопользования в шельфовых морях (экологическая география моря). Апатиты: изд. КНЦРАН, 2002. 502 с
17. *Алексеев Г.В., Большианов Д.Ю., Радионов В.Ф., Фролов С.В.* 95 лет исследований климата и криосферы в Арктике в ААНИИ // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 4. С. 127–140.
18. *Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A.* An overview of CMIP5 and the experiment design // Bull. Amer. Meteorol. Society. 2012. V. 93. № 4. P. 485–498.
19. *Deser C., Phillips A., Bourdette V., Teng H.* Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability // Climate Dynamics. 2012. V. 38. № 3–4. P. 527–546.
20. *Яковлев Н.Г.* Воспроизведение крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного ледовитого океана в 1948–2002 гг. Ч. 1: Численная модель и среднее состояние // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 3. С. 383–398.
21. *Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А.* Изменения распространения морских льдов в Арктике и связанные с ними климатические эффекты: диагностика и моделирование // Лёд и Снег. 2013. № 2 (122). С. 53–62.
22. *Панин Г.Н., Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В., Выручалкина Т.Ю.* Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2 (26). С. 35–52.
23. *Котляков В.М., Глазовский А.Ф., Фролов И.Е.* Оледенение в Арктике. Причины и следствия глобальных изменений // Вест. РАН. 2010. Т. 80. № 3. С. 225–234.
24. *Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K., Daniel J.S., Kainuma M.L.T., Lamarque J-F., Matsumoto K., Montzka S.A., Raper S.C.B., Riahi K., Thomson A., Velders G.J.M., van Vuuren D.P.P.* The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // Climatic Change. 2011. V. 109. № 1–2. P. 213–241.
25. *Павлова Т.В., Катцов В.М.* Площадь ледяного покрова Мирового океана в расчетах с помощью моделей CMIP5 // Тр. ГГО. 2013. Т. 568. С. 7–35.
26. *Stroeve J.C., Kattsov V., Barrett A., Serreze M., Pavlova T., Holland M., Meier W.N.* Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations // Geophys. Research Letters. 2012. V. 39. L16502. P. 399–409.
- razreze «Kol'skiy meridian». 100 let okeanograficheskikh nablyudeniy na razreze «Kolskiy meridian». Research and long-term forecasting of thermal processes on the «Kola meridian» section. 100 years of oceanographic observations on the «Kola meridian». Murmansk: PINRO, 2005: 15–31. [In Russian].*
16. *Denisov V.V. Ekologo-geograficheskie osnovy ustoychivogo prirodopolzovaniya v shelfovykh moryakh (ekologicheskaya geografiya morya). Ecological-geographical bases of sustainable nature management in the offshore seas (ecological geography of the sea). Apatity: KNT RAS, 2002: 502 p. [In Russian].*
17. *Alekseev G.V., Bolshiyarov D.Yu., Radionov V.F., Frolov S.V. 95 let issledovaniy klimata i kriosfery v Arktike v AANII. 95 Years of Climate and Cryosphere Studies in the Arctic in AARI. Led i Sneg. Ice and Snow. 2015, 55 (4): 127–140. [In Russian].*
18. *Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A.* An overview of CMIP5 and the experiment design. Bull. Amer. Meteorol. Society. 2012, 93 (4): 485–498.
19. *Deser C., Phillips A., Bourdette V., Teng H.* Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. Climate Dynamics. 2012, 38 (3–4): 527–546.
20. *Yakovlev N.G.* Reproduction of the large-scale state of waters and sea ice of the Arctic Ocean in 1948–2002. Pt. 1: The numerical model and the mean state. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana.* Proc. of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Atmosphere and Ocean. 2009, 45 (3): 383–398. [In Russian].
21. *Mohov I.I., Semenov V.A., Hon V.Ch., Pogarskiy F.A.* Changes in the distribution of sea ice in the Arctic and related climatic effects: diagnostics and modeling. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2013, № 2 (122): 53–62. [In Russian].
22. *Panin G.N., Dianskiy N.A., Solomonova I.V., Gusev A.V., Vyruchalkina T.Yu.* Assessment of climate change in the Arctic in the 21st century on the basis of a combined forecast scenario. *Arktika: ekologiya i ekonomika.* Arktika: ecology and economics. 2017, 2 (26): 35–52. [In Russian].
23. *Kotlyakov V.M., Glazovskiy A.F., Frolov I.E.* Oledenenie v Arktike. Prichiny i sledstviya globalnykh izmeneniy. Glaciation in the Arctic. The causes and consequences of global change. *Vestnik Rossiyskoy Akademii nauk.* Herald of the Academy of Sciences. 2010, 80 (3): 225–234. [In Russian].
24. *Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K., Daniel J.S., Kainuma M.L.T., Lamarque J-F., Matsumoto K., Montzka S.A., Raper S.C.B., Riahi K., Thomson A., Velders G.J.M., van Vuuren D.P.P.* The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change.* 2011, 109 (1–2): 213–241.
25. *Pavlova T.V., Kattsov V.M.* Area of the ice cover of the World Ocean in calculations using CMIP5 models. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeykova.* Proc. of the Voeikov Main Geophysical Observatory. 2013, 568: 7–35. [In Russian].
26. *Stroeve J.C., Kattsov V., Barrett A., Serreze M., Pavlova T., Holland M., Meier W.N.* Trends in Arc-

27. Электронный ресурс: <http://www.pinro.ru>.
28. Электронный ресурс: <http://nsidc.org/data/nsidc-0051.html>.
29. Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation // *Science*. 1995. V. 269. P. 676–679.
30. Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. // *Geophys. Research Letters*. 2001. V. 28. P. 2077–2080.
31. Сизов А.А. О крупномасштабной изменчивости циркуляции и теплового состояния атмосферы и океана в Северной Атлантике // *Морской гидрофизич. журнал*. 1991. № 5. С. 22–26.
32. Chylek P., Folland C.K., Lesins G., Dubey M.K., Wang M.Y. Arctic air temperature amplification and the Atlantic multidecadal oscillation // *Geophys. Research Letters*. 2009. V. 36. L14801.
33. Семенов В.А., Черенкова Е.А. Оценка влияния Атлантической мультидекадной осцилляции на крупномасштабную атмосферную циркуляцию в Атлантическом секторе в летний сезон // *ДАН*. 2018. Т. 478. № 6. С. 697–701.
34. 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. P. 415–449.
35. Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature // *Journ. of Climate*. 2010. V. 23. P. 5668–5677.
36. Dickson R.R., Osborn T.J., Hurrell J.W., Meincke J., Blindheim J., Adlandsvik B., Vinje T., Alekseev G., Maslovski W. The Arctic Ocean response to the North Atlantic oscillation // *Journ. of Climate*. 2000. V. 13. P. 2671–2696.
37. Comiso J.C., Nishio F. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data // *Journ. of Geophys. Research*. 2008. V. 113. C02S07. doi: 10.1029/2007JC004257.
38. Pistone K., Eisenmann I., Ramanathan V. Observational determination of Albedo decrease caused by vanishing Arctic sea ice // *Proc. National Acad. of Sciences*. 2014. V. 11. № 9. P. 3322–3326.
39. Золотокрылин А.Н., Михайлов А.Ю., Титкова Т.Б. Влияние притоков теплых атлантических вод на аномалии климата в арктическом секторе Арктики // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 3. С. 73–82.
- tic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations. *Geophys. Research Letters*. 2012, 39: L16502. doi:10.1029/2012GL052676.
27. <http://www.pinro.ru>. [In Russian].
28. <http://nsidc.org/data/nsidc-0051.html>. [In Russian].
29. Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*. 1995, 269: 676–679.
30. Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophys. Research Letters*. 2001, 28: 2077–2080.
31. Sizov A.A. On the large-scale variability of the circulation and thermal state of the atmosphere and ocean in the North Atlantic. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal. Journ. of Physical. Oceanography*. 1991, 5: 22–26. [In Russian].
32. Chylek P., Folland C.K., Lesins G., Dubey M.K., Wang M.Y. Arctic air temperature amplification and the Atlantic multidecadal oscillation. *Geophys. Research Letters*. 2009, 36: L14801.
33. Semenov V.A., Cherenkova E.A. Estimation of the influence of Atlantic multi-decadal oscillations on large-scale atmospheric circulation in the Atlantic sector in the summer season. *Doklady Akademii nauk. Proc. of the Academy of Sciences*. 2018, 478 (6): 697–701. [In Russian].
34. 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: 415–449.
35. Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature. *Journ. of Climate*. 2010, 23: 5668–5677.
36. Dickson R.R., Osborn T.J., Hurrell J.W., Meincke J., Blindheim J., Adlandsvik B., Vinje T., Alekseev G., Maslovski W. The Arctic Ocean response to the North Atlantic oscillation. *Journ. of Climate*. 2000, 13: 2671–2696.
37. Comiso J.C., Nishio F. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data. *Journ. of Geophys. Research*. 2008, 113: C02S07. doi: 10.1029/2007JC004257.
38. Pistone K., Eisenmann I., Ramanathan V. Observational determination of Albedo decrease caused by vanishing Arctic sea ice. *Proc. Natl. Acad. Sci*. 2014, 11 (9): 3322–3326.
39. Zolotokrylin A.N., Mihaylov A.Yu., Titkova T.B. Influence of warm Atlantic water tributaries on climate anomalies in the Arctic sector of the Arctic. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2015, 55 (3): 73–82. [In Russian].