

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ ЛЕДОВИТОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

С.Б. Крашенинникова¹, И.Г. Шокурова², А.Н. Демидов³

¹ ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского» РАН, отдел функционирования морских экосистем, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: svetlanabk@mail.ru

² Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт» РАН, отдел океанографии, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: igshokurova@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: alik1@mail.ru

Выявлены особенности пространственного распределения скорости поверхностных течений и температуры Северной Атлантики с использованием океанического реанализа ORA-S4 в условиях изменяющейся ледовитости Баренцева моря, оцененной по данным инструментальных наблюдений за 1958–2014 гг. На основе анализа полей пространственного распределения коэффициентов прямых корреляций и со сдвигом в один год между указанными параметрами установлены районы со значимыми связями. Наибольшие коэффициенты корреляции ледовитости в Баренцевом море получены для районов северных границ Гольфстрима и Южного пассатного течения, а также Трансарктического течения. Коэффициент корреляции среднегодовых значений температуры в Баренцевом море с температурой и скоростью течений в Гольфстриме составляет 0,86 и 0,75 соответственно. Увеличение ледовитости происходит при усилении скорости Трансарктического течения. Корреляция между температурой Баренцева моря и скоростью этого течения к северо-западу от арх. Шпицберген составляет –0,72. Скорость в районах северных границ Гольфстрима и Южного пассатного течения, температура в Гольфстриме и Баренцевом море имеют положительные тренды в межгодовой изменчивости, а скорость в Трансарктическом течении и ледовитость Баренцева моря – отрицательные.

Ключевые слова: морской лед, скорости течений, ТПО, многолетняя изменчивость, Северо-Европейский бассейн

ВВЕДЕНИЕ

Арктика представляет стратегический интерес для России как нефтегазовый, промысловый и транспортный регион. Поэтому его изучение является одной из приоритетных задач последних десятилетий [Алексеев и др., 2017; Жичкин, 2015; Матишов, Дженюк, 2012]. Мониторинг ледовитости Арктики ведется уже более 100 лет и позволяет дать сравнительно точную оценку низкочастотной изменчивости количества льда.

Многолетние исследования показывают, что приповерхностная температура воды в Арктическом регионе растет в два раза быстрее, чем в других районах Мирового океана [Cohen et al., 2014]. Площадь ледового покрова в Арктике летом и зимой постоянно сокращается, что заметно проявляется в Баренцевом море [Onarheim, Årthun, 2017; Buettner et al., 2020]. Ледовитость в Баренцевом море за период спутниковых наблюдений с 1979 г. сократилась зимой до одной трети от начального значения и достигла своего минимального значения за весь многовековой период наблюдений [Onarheim, Årthun, 2017]. За счет уменьшения площади ледяного покрова в Арктике происходит из-

менение поверхностного теплового баланса. Оно выражается в увеличении поглощенной солнечной радиации в результате уменьшения альбедо и увеличения турбулентного тепло-влагообмена [Serreze, Barry, 2011]. Такая перестройка теплового баланса влечет за собой изменение теплосодержания нижних слоев атмосферы, что сказывается на режиме облачности и атмосферной циркуляции.

Из-за значительных вариаций ледовитости в сочетании с высокой для данных широт температурой морской поверхности Баренцево море в последние годы принято считать одной из энергоактивных зон Мирового океана, а изменчивость его ледовитости можно рассматривать в качестве важного индикатора климатических изменений.

Причины изменений площади ледяного покрова до сих пор являются предметом дискуссии [Serreze, Barry, 2011]. Уменьшение площади льда в Арктике чаще всего связывают с влиянием атмосферной циркуляции [Dahlke, Maturilli, 2017; Hall et al., 2020]. В работе [Dahlke, Maturilli, 2017] показано, что около четверти наблюдаемых тенденций зимнего приповерхностного потепления в Северо-Европейском бассейне обусловлены увеличением адвек-

ции теплого и влажного воздуха из низких широт Северной Атлантики.

На связь изменений ледовой обстановки в арктическом регионе и термических условий в тропиках через атмосферную циркуляцию и, в частности, через атмосферные волны Россби указывается в работах [Hall et al., 2020; McCrystall et al., 2020]. Обнаружены также связи изменчивости ледовитости в Арктике с глобальными климатическими сигналами – Североатлантическим колебанием и Атлантической мультideкадной осцилляцией [Крашенинникова, Крашенинникова, 2019; Семенов и др., 2017]. На основе расчетов атмосферных потоков явного и скрытого тепла в районе 70° с. ш. в зимний период показано, что среднее многолетнее термодинамическое состояние Баренцева моря существенно определяется меридиональным переносом тепла из Атлантики

[Алексеев и др., 2017]. В период спутниковых наблюдений (1981–2018) летние аномалии температуры атлантических вод, поступающих в Арктику, объясняют более 80% дисперсии изменчивости первой моды сплоченности морского льда в последующем зимнем сезоне [Schlichtholz, 2019]. В связи с этим актуальной является задача анализа изменчивости скорости течений в Северной Атлантике, переносящих теплую воду из низких в высокие широты и расчеты количественных оценок связей между этими изменениями, площадью ледового покрова в Арктике и, в частности, ледовитостью в Баренцевом море.

Цель работы – выявление особенностей в полях скоростей течений и температуры в поверхностном слое Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна, проявляющихся при изменениях ледовитости в Баренцевом море.

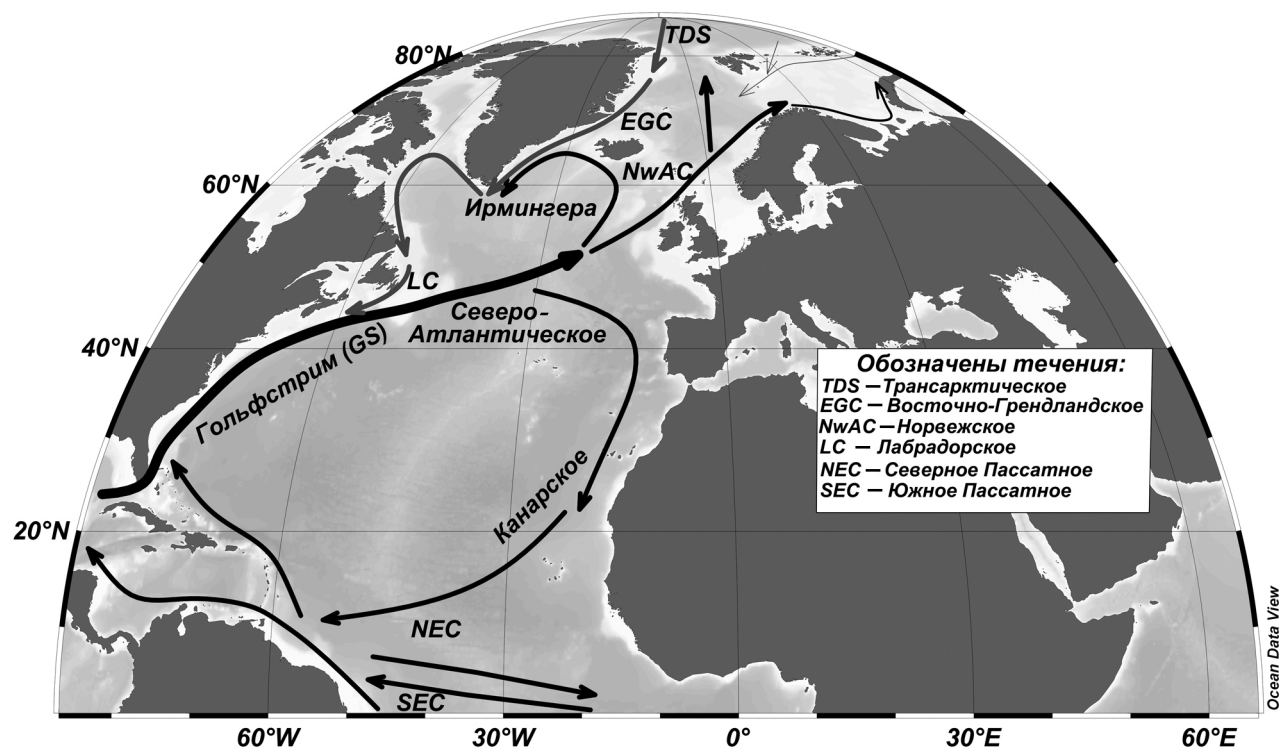


Рис. 1. Общая схема циркуляции в районе исследования

Fig. 1. General circulation scheme within the study area

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовались среднемесячные значения потенциальной температуры на глубине 5 м θ (°C) и скорости поверхностных течений u , v (м/с) океанического реанализа ORA-S4 [Balmaseda et al., 2013] с пространственным разрешением ($1 \times 1^\circ$) за 1958–2017 гг. в районе 0–89° с. ш., 85° з. д. – 60° в. д.

Использование океанического реанализа ORA-S4 обусловлено тем, что он достаточно хорошо описывает поверхностные скорости течений и температуру в Северной Атлантике на межгодовых и междесятилетних масштабах [Krashennikova et al., 2020, 2021].

Были привлечены среднегодовые натурные данные по ледовитости Баренцева моря за 1958–

2014 гг., собранные по работам [Воробьев и др., 2010; Жичкин, 2015; Матишов, Дженюк, 2012].

В работе рассматривается регион, включающий в себя Северную Атлантику и ряд морей Северо-Европейского бассейна: Гренландское, Норвежское, Баренцево (рис. 1).

Для анализа связей между вариациями ледовых условий в Баренцевом море и изменчивостью поверхностной циркуляции в исследуемом регионе вычислялись коэффициенты корреляции между временным рядом ледовитости и рядами температуры поверхностного слоя океана и скорости течений. Рассчитывались прямые корреляции (r) между ледовитостью и январскими значениями скорости течений и температуры, и сдвиговые корреляции (r_{-1}) с рядами среднегодовых значений за предыдущий год.

Для анализа межгодовой изменчивости изучаемых параметров были выделены районы с высокими значениями корреляции между изменчивостью ледовитости в Баренцевом море, скоростью течений и температурой в Северной Атлантике и Северо-Европейском бассейне: А – район северной границы Гольфстрима ($41\text{--}42^\circ$ с. ш., $56\text{--}59^\circ$ з. д.), В – Трансарктическое течение ($75\text{--}77^\circ$ с. ш., $3\text{--}7^\circ$ з. д.), С – район северной границы Южного пассатного течения ($0\text{--}3^\circ$ с. ш., $16\text{--}32^\circ$ з. д.), D – стрежень Гольфстрима ($38\text{--}42^\circ$ с. ш., $52\text{--}62^\circ$ з. д.), Е – Баренцево море ($70\text{--}75^\circ$ с. ш., $40\text{--}45^\circ$ з. д.).

В выделенных районах анализировались долговременные тенденции изменений температуры и скорости течений. Для районов А, В, С, D проводилось сравнение полей скорости течений в периоды с наибольшими (1966–1969, 1978–1982) и наименьшими (2000–2002, 2004–2007) значениями ледовитости.

Значимость линейных трендов временных рядов и коэффициентов корреляции определялась на основе t -критериев Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственное распределение коэффициентов корреляции. На рис. 2 представлено пространственное распределение положительных (см. рис. 2А) и отрицательных значений (см. рис. 2Б) коэффициентов корреляции между среднегодовой ледовитостью в Баренцевом море и модулем скорости течений в каждом узле сетки за предшествующий год. Положительная связь скоростей течений с ледовитостью ($r = 0,5 \dots 0,62$) получена на южной границе зонального участка Гольфстрима и в Трансарктическом течении (см. рис. 2А). Кроме того, положительные значения корреляции скорости Гольфстрима с ледовитостью находятся на восточной границе Гольфстрима в районе $30\text{--}35^\circ$ с. ш. При увеличении скоростей течений в этих районах ледо-

витость в Баренцевом море возрастала. Отрицательная связь изменчивости ледовитости в Баренцевом море со скоростью течений ($r = -0,64 \dots -0,5$) получена в районах северной границы Гольфстрима, Северо-Атлантического течения, Восточно-Гренландского течения, а также части Южного пассатного течения, находящейся в Северном полушарии (см. рис. 2Б). При усилении этих течений в указанных районах ледовитость уменьшалась.

В Гольфстриме участок с отрицательными значениями корреляции расположен на северной границе потока (см. рис. 2А, В, район А), с положительными – на южной границе, что может свидетельствовать о меридиональных смещениях течения, аналогичных смещениям в районе Северной стены Гольфстрима [Krashenninnikova et al., 2020].

В проливе Фрама отрицательные коэффициенты корреляции наблюдаются в районе Восточно-Гренландского течения, а положительные – в восточной части пролива, ближе к арх. Шпицберген (район В), а также вдоль северной границы Баренцева моря. Так как Восточно-Гренландское течение является продолжением Трансарктического течения, то такое пространственное распределение значений коэффициентов корреляции можно интерпретировать следующим образом: увеличение ледовитости происходит при усилении Трансарктического течения в восточной части пролива и вдоль северной границы Баренцева моря и ослаблении Восточно-Гренландского течения вблизи берега Гренландии (см. рис. 2А, Г).

Наиболее высокие значения коэффициента корреляции находятся в экваториальном районе (район С). Усиление скорости в районе северной границы Южного пассатного течения предшествует ослаблению ледовитости в Баренцевом море (см. рис. 2Б, Д).

Для января при расчете корреляции без сдвига отрицательная связь скорости течений в Северной Атлантике с ледовитостью Баренцева моря, кроме указанных районов, получена для района Норвежского течения.

Пространственное распределение положительных значений коэффициента корреляции между ледовитостью в Баренцевом море и потенциальной температурой в поверхностном слое со сдвигом на один предшествующий год представлено на рис. 3А, отрицательных значений – на рис. 3Б.

Области с положительными коэффициентами корреляции расположены в Арктическом бассейне. Высокие отрицательные значения коэффициентов корреляции находятся в стрейне Гольфстрима (район D), в Норвежском течении и в Баренцевом море (район Е) (см. рис. 3). Ледовитость уменьшается при повышении температуры в этих районах за счет переноса более теплой воды из низких широт в высокие. В январе наблюдается аналогичное распределение коэффициентов корреляции.

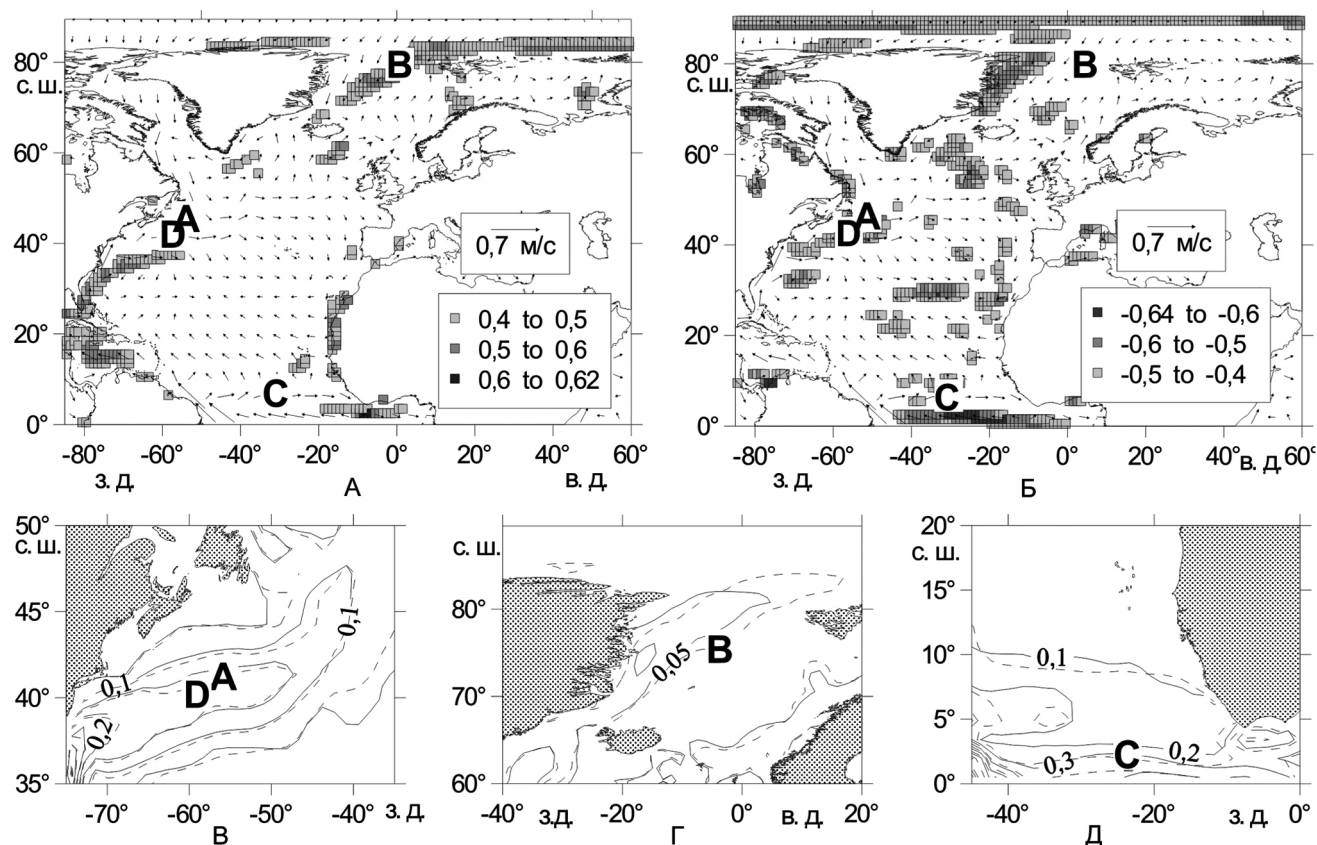


Рис. 2. Пространственное распределение положительных (А) и отрицательных (Б) значений коэффициентов корреляции между временными рядами среднегодовой ледовитости Баренцева моря и среднегодовых значений модуля скорости течений со сдвигом на предыдущий год:
 стрелки – среднемноголетнее поле скорости за 1958–2017 гг., м/с; изолинии модуля скорости течений (В–Д) в периоды с наибольшими (1966–1969, 1978–1982 гг., пунктирная линия) и наименьшими (2000–2002, 2004–2007 гг., сплошная линия и значения скорости) значениями ледовитости, м/с; А, В, С, D – выделенные районы с максимальными значениями корреляций

Fig. 2. Spatial distribution of positive (A) and negative (B) values of correlation coefficients between time series of the average annual ice extent in the Barents Sea and the average annual values of current velocity module (with a shift to the previous year):
 arrows – mean long-term velocity field m/s for 1958–2017; isolines of the modulus of current velocity (m/s) (B–D) for the periods of the highest (1966–1969, 1978–1982 – dotted line), and the smallest (2000–2002, 2004–2007 – solid line and velocity values) ice extent;
 A, B, C, D are the areas with the maximum values of correlation

В таблице приведены средние значения коэффициентов корреляции, полученные на основании прямого и сдвигового корреляционных анализов рядов характеристик для пяти выбранных районов (см. рис. 2, 3). Связи межгодовой изменчивости ледовитости со скоростью течений за предыдущий год в районах северных границ Гольфстрима ($r = -0,57$, район А) и Южного пассатного течения ($r = -0,60$, район С) оказались более высокими, чем связи с январскими значениями (см. табл.). Также были рассчитаны коэффициенты корреляции со сдвигом до 7 лет. Однако более значимых корреляционных связей со сдвигом более 1 года выявить не удалось. Значимые связи с запаздыванием от 9 до 58 месяцев климатических характеристик в Баренцевом море с аномалиями температуры в районе Ньюфаундленда и в тропической части Атлантики ранее были получены в работе [Алексеев и др., 2016].

Коэффициент корреляции среднегодовых значений температуры в Баренцевом море (район Е) с температурой в Гольфстриме (район D) составляет 0,86, а со скоростью течений на северной границе Гольфстрима (район А) – 0,75 (см. табл.).

Межгодовая изменчивость температуры и скорости течений. На рис. 4 представлена межгодовая изменчивость ледовитости в Баренцевом море и скорости течений в районах А–С, а также температуры поверхности в районах D–Е, соответственно, и их линейные тренды.

Линейные тренды, выделенные на 1% уровне значимости (см. рис. 4), демонстрируют уменьшение средней ледовитости Баренцева моря на 30% (см. рис. 4А), увеличение температуры в Гольфстриме (район D) в среднем на 2°C и в районе Баренцева моря (район Е) на $1,5^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 4В) за 1958–2017 гг. Скорость в стрежне Гольфстрима

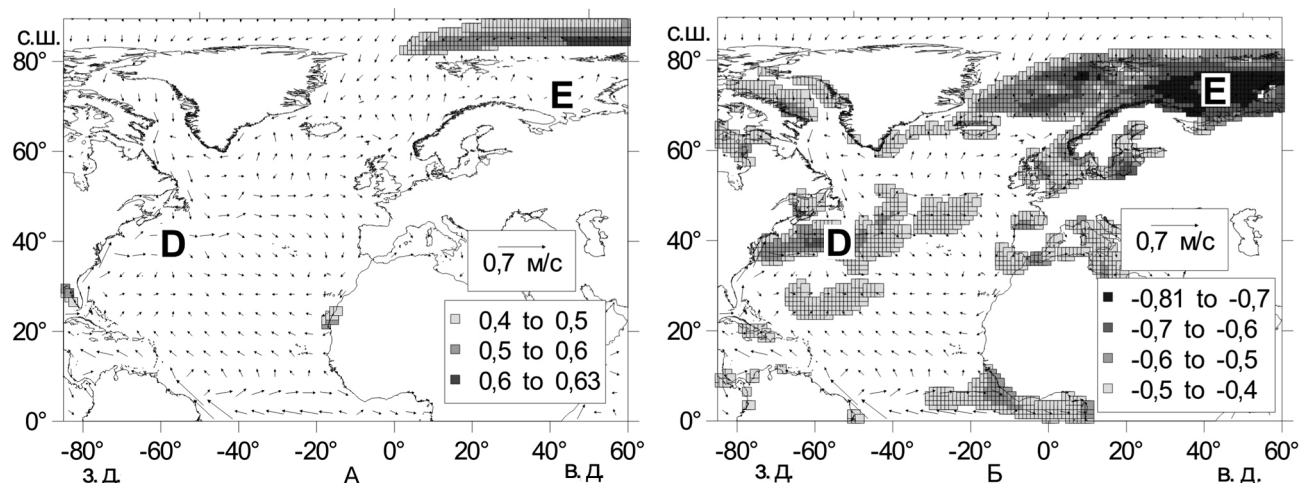


Рис. 3. Пространственное распределение положительных (А) и отрицательных (Б) значений коэффициентов корреляции между временными рядами среднегодовой ледовитости Баренцева моря и среднегодовыми значениями q на глубине 5 м со сдвигом на предыдущий год: стрелки – среднемноголетнее распределение поля скорости течений за 1958–2017 гг., м/с; D, E – выделенные районы с максимальными значениями корреляций

Fig. 3. Spatial distribution of positive (A) and negative (B) values of correlation coefficients between time series of the mean annual ice cover in the Barents Sea and the mean annual SST values (with a shift to the previous year): arrows – mean long-term current velocity field (m/s) for 1958–2017; D, E – highlighted areas with maximum correlation values

Таблица

Средние значения коэффициентов прямой (r) и сдвиговой (r_{-1})* корреляций между временными рядами ледовитости (Ice) в Баренцевом море, температурой (θ), модулем (V) и зональной компонентой (u) скорости течений в районах А–Е

Скорость течения		Ice	u_A	V_B	u_C	θ_D	θ_E
	Ice	1	-0,55; -0,57*	0,57	0,60*; -0,64	-0,70*; -0,77	-0,77
	u_A	-0,55; -0,57*	1	-0,71; -0,69*	-0,62; -0,57*	0,81	0,75; 0,66*
	V_B	0,57	-0,71; -0,69*	1	0,69; 0,68*	-0,69; -0,68*	-0,72
	u_C	0,57; 0,60*	-0,62; -0,57*	0,69; 0,68*	1	-0,71; -0,71*	-0,72; -0,65*
Температура	θ_D	-0,64; -0,70*	0,81	-0,69; -0,68*	-0,71; -0,71*	1	0,86; 0,77*
	θ_E	-0,77	0,75; 0,66*	-0,72	-0,72; -0,65*	0,86; 0,77*	1

(район D) увеличилась на 0,02 м/с, а на его северной границе (район А) на 0,04 м/с. Скорость в районе северной границы Южного пассатного течения (район С) увеличилась на 0,1 м/с (см. рис. 4Б). Скорость Трансарктического течения в районе В уменьшилась на 0,03 м/с (см. рис. 4А). Направления и значения линейных трендов совпадают с аналогичными оценками ледовитости в Баренцевом море и температуры в районе Гольфстрима, полученными в работах [Taboada, Anadón, 2012; Leifer et al., 2018; Onarheim, Årthun, 2017; Buettner et al., 2020].

Отрицательный тренд изменения скорости Трансарктического течения (район В), приносящего холодную воду из Арктики, сопровождается положительным трендом температуры в Баренцевом море (район Е) (см. рис. 4А) и отрицательным трендом ледовитости (см. рис. 4Б). Рассчитанные между ними коэффициенты корреляции равны соответственно -0,72 и 0,57.

Полученные тренды в изменчивости температуры и скорости течений хорошо согласуются с результатами исследований изменчивости океаниче-

ских процессов в Северной Атлантике и Мировом океане в целом [Hu et al., 2020; Wu et al., 2012; Yang et al., 2016]. Спутниковые наблюдения за высотой и температурой морской поверхности показывают сдвиг к полюсу основных океанических круговоротов в течение последних четырех десятилетий [Yang et al., 2016; Hu et al., 2020]. Кроме того, наблюдается усиление западных течений [Yang et al., 2016] и увеличение в них температуры [Wu et al., 2012]. Данные изменения связывают с увеличением ветрового воздействия [Wu et al., 2012; Yang et al., 2016]. Эти результаты могут служить объяснением наличия положительных трендов в изменчивости скорости течений на северных границах Гольфстрима и Южного пассатного течения, а также высоких значений коэффициента корреляции между ними. Коэффициент линейного тренда скорости течения

в районе северной границы Гольфстрима (район А) выше, чем в его срежневой части (район D) (см. рис. 3Б), что также указывает на сдвиг течения к северу. Необходимо отметить, что в основном этот сдвиг имел место с 1960-х до середины 1990-х гг. Согласованность изменчивости среднегодовой температуры в Баренцевом море с вариациями скорости на северной границе Южного пассатного течения с запаздыванием в один год ($r = 0,72$) также может быть обусловлена одновременными смещениями к полюсу основных океанических круговоротов.

Полученные оценки подтверждают существенное влияние переноса тепла системой Гольфстрим – Северо-Атлантическое течение на Арктический регион. В работе [Polonsky, Sukhonos, 2016] показано, что вклад адвективных переносов тепла и горизонтального турбулентного обмена в низкочастотную

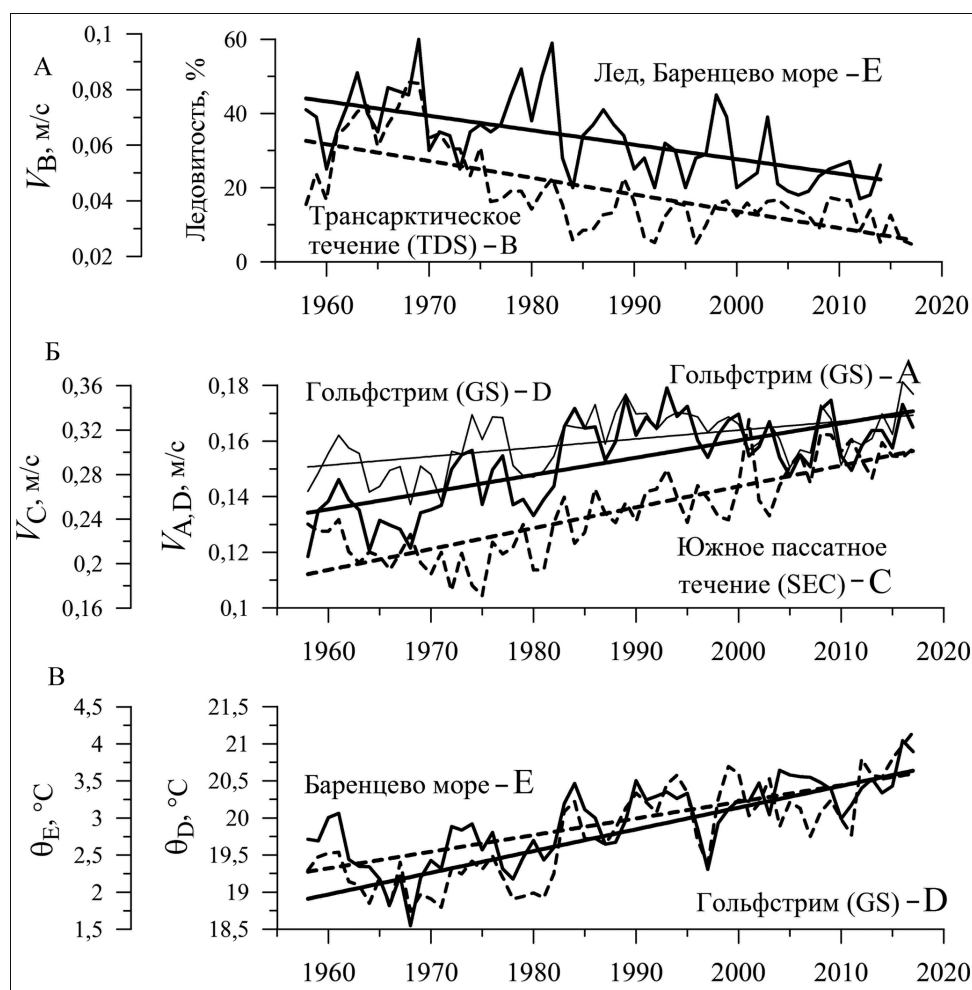


Рис. 4. Межгодовая изменчивость среднегодовых значений и линейные тренды: ледовитости в Баренцевом море и модуля скорости в Трансарктическом течении (район В) (А); в Гольфстриме (район D) – тонкая линия, в районе его северной границы (район А) и на северной границе Южного пассатного течения (район С) (Б); температуры (пунктирная линия) в Гольфстриме (район D) и Баренцевом море (район Е) (В) за 1958–2017 гг.

Fig. 4. Interannual variability of mean annual values and linear trends of: ice extent in the Barents Sea and velocity modulus in the Transpolar Drift Stream (region B) (A); in the Gulf Stream (region D) – a thin line, in the area of its northern border (region A) and on the northern border of the South Equatorial current (region C) (B); temperatures (dotted line) in the Gulf Stream (region D) and the Barents Sea (region E) (B) for 1958–2017

изменчивость температуры верхнего слоя Атлантики превышает вклад тепловых потоков на поверхности океана. При этом важную роль также может играть перенос теплых воздушных масс из Атлантического региона в Арктику [Sato et al., 2014].

ВЫВОДЫ

В работе на основе скоростей течений и температуры поверхностного слоя в Северной Атлантике, океанического реанализа ORA-S4, а также натурных данных о ледовитости Баренцева моря проведен анализ связи между временными рядами среднегодовых и январских значений этих характеристик за 1958–2014 гг. Корреляционный анализ показал, что наиболее значимые связи достигаются при сдвиге в один год для среднегодовых значений и без сдвига – для январских значений.

Получено, что изменение ледовитости и увеличение температуры в Баренцевом море связаны с изменчивостью скорости Трансарктического течения у северной границы моря ($r = 0,57$ и $r = -0,72$ соответственно). Изменчивость температуры в Баренцевом море в исследуемый период наблюдений имела положительную тенденцию, а скорости

Трансарктического течения и ледовитости Баренцева моря – отрицательную. Уменьшение ледовитости в Баренцевом море происходило на фоне увеличения скорости течений в районах северных границ Гольфстрима и Южного пассатного течения, а также при увеличении температуры в стрессе Гольфстрима. Коэффициенты корреляции температуры в Баренцевом море с температурой воды и скоростью течений на северной границе Гольфстрима составляют 0,86 и 0,75 соответственно.

Дальние связи ледовитости в Баренцевом море с изменчивостью течений в Северной Атлантике, несмотря на высокие значения коэффициентов корреляции, имеют опосредованный характер и, вероятно, являются следствием взаимодействия комплекса факторов в системе океан – атмосфера [Russotto, Biasutti, 2020]. Одной из возможных причин полученных связей изменчивости ледовитости в Баренцевом море со скоростью на северных границах Гольфстрима и Южного пассатного течения может служить выявленное в [Yang et al., 2016; Hu et al., 2020] одновременное смещение основных океанических круговоротов к полюсу в последние четыре десятилетия.

Благодарности. Работа выполнена по темам государственного задания ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (121041400077-1), Морского гидрофизического института РАН «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера, определяющие региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата» (0555-2021-0002), а также при поддержке гранта РНФ (19-17-00110-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В., Глок Н.И., Смирнов А.В., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в районе Баренцева моря и их предсказуемость // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 38–56.
- Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Глок Н.И. Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на атмосферный перенос тепла в Арктику // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 1. С. 106–123. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-1-106-123.
- 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.
- Жичкин А.П. Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. Т. 1. № 20. С. 55–64.
- Крашенинникова С.Б., Крашенинникова М.А. Причины и особенности долговременной изменчивости ледовитости Баренцева моря // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 112–122. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-112-122.
- Матишов Г.Г., Дженьюк С.Л. Морская хозяйственная деятельность в Российской Арктике в условиях современных климатических изменений // Экология и экономика. 2012. № 1(5). С. 26–37.
- 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 // Лед и снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107.
- Balmaseda M.A., Mogenssen K., Weaver A.T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, vol. 139, no. 674, p. 1132–1161.
- Buettner S., Ivanov V.V., Kassens H., Kusse-Tiuz N.A. Distribution of suspended particulate matter in the Barents Sea in late winter 2019, *Arctic and Antarctic Research*, 2020, vol. 66, no. 3, p. 267–278, DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-267-278.
- Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nature geosciences*, 2014, vol. 7, no. 9, p. 627–637, DOI: 10.1038/ngeo2234.

- Dahlke S., Maturilli M. Contribution of Atmospheric Advection to the Amplified Winter Warming in the Arctic North Atlantic Region, *Advances in Meteorology*, 2017, Article ID 4928620, 8 p., DOI: 10.1155/2017/4928620.
- Hall R.J., Hanna E., Chen L. Winter Arctic Amplification at the synoptic timescale, 1979–2018, its regional variation and response to tropical and extratropical variability, *Climate Dynamics*, 2020, p. 1–17, DOI: 10.1007/s00382-020-05485-y.
- Hu S., Sprintall J., Guan C., McPhaden M., Fan Wang F., Hu D., Cai W. Deep-reaching acceleration of global mean ocean circulation over the past two decades, *Science advances*, 2020, vol. 6, no. 6, p. 1–8, DOI: 10.1126/sciadv.aax7727.
- Krasheninnikova S.B., Demidov A.N., Ivanov A.A. Variability of the Characteristics of the Antarctic Bottom Water in the Subtropical North Atlantic, *Oceanology*, 2021, vol. 61, iss. 2, p. 151–158, DOI: 10.1134/S0001437021020090.
- Krasheninnikova S.B., Shokurova I.G., Shokurov M.V. Winter Currents Velocity and Sea Surface Temperature Anomalies Accompanying the Gulf Stream North Wall Displacements, *Oceanology*, 2020, vol. 60, iss. 1, p. 20–28, DOI: 10.1134/S0001437020010154.
- Leifer I., Chen F.R., McClimans T., Karger F.M. Satellite ice extent, sea surface temperature, and atmospheric methane trends in the Barents and Kara Seas, *The Cryosphere Discussions*, 2018, p. 1–45, DOI: 10.5194/tc-2018-75.
- McCrystall M.R., Hosking J., Maycock A. The impact of changes in tropical sea surface temperatures over 1979–2012 on Northern Hemisphere high-latitude climate, *Journal of Climate*, 2020, vol. 33, no. 12, p. 5103–5121.
- Onarheim I.H., Årthun M. Toward an ice-free Barents Sea, *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, no. 16, p. 8387–8395, DOI: 10.1002/2017gl074304.
- Polonsky A.B., Sukhonos P.A. Evaluation of the heat balance constituents of the upper mixed layer in the North Atlantic, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, vol. 52, no. 6, p. 649–658, DOI: 10.1134/S0001433816060141.
- Russotto R.D., Biasutti M. Polar amplification as an inherent response of a circulating atmosphere: Results from the TRACMIP aquaplanets, *Geophysical Research Letters*, 2020, vol. 47, no. 6, p. e2019GL086771, DOI: 10.1029/2019GL086771.
- Sato K., Inoue J., Watanabe M. Influence of the Gulf Stream on the Barents Sea ice retreat and Eurasian coldness during early winter, *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9, no. 8, p. 084009, DOI: 10.1088/1748-9326/9/8/084009.
- Schlichtholz P. Subsurface ocean flywheel of coupled climate variability in the Barents Sea hotspot of global warming, *Scientific reports*, 2019, vol. 9, no. 1, p. 1–16, DOI: 10.1038/s41598-019-49965-6.
- Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global and planetary change*, 2011, vol. 77, no. 1–2, p. 85–96, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.
- Taboada F.G., Anadón R. Patterns of change in sea surface temperature in the North Atlantic during the last three decades: beyond mean trends, *Climatic Change*, 2012, vol. 115, no. 2, p. 419–431, DOI: 10.1007/s10584-012-0485-6.
- Wu L., Cai W., Zhang L., Timmermann A. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents, *Nature Climate Change*, 2012, vol. 2, no. 3, p. 161–166.
- Yang H., Lohmann G., Wei W., Dima M. Intensification and poleward shift of subtropical western boundary currents in a warming climate, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, vol. 121, no. 7, p. 4928–4945, DOI: 10.1002/2015JC011513.

Поступила в редакцию 26.03.2021

После доработки 19.06.2021

Принята к публикации 09.03.2022

FEATURES OF SURFACE CIRCULATION IN THE NORTH ATLANTIC DURING THE CHANGES IN THE ICE COVER OF THE BARENTS SEA

S.B. Krasheninnikova¹, I.G. Shokurova², A.N. Demidov³

¹A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Functioning of Marine Ecosystems Department, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: svetlanabk@mail.ru

²Marine Hydrophysical Institute of RAS, Oceanography Department, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: igshokurova@mail.ru

³Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: alik1@mail.ru

Specific features of the spatial distribution of the surface currents velocity and the temperature in the North Atlantic were revealed using the ORA-S4 ocean reanalysis under the changing ice cover of the Barents Sea, estimated from the instrumental observations data for 1958–2014. Based on the analysis of spatial distribution of direct correlation coefficients and those with a one-year shift between the indicated parameters, the regions with significant correlation were identified. The highest correlation coefficients between the ice coverage in the Barents Sea were obtained for the regions at the northern boundaries of the Gulf Stream and the South Equatorial current, as well as for the Transpolar Drift Stream. The correlation coefficients of the mean annual temperature values in the Barents Sea with the temperature and velocity of currents in the Gulf Stream are

0,86 and 0,75, respectively. The ice coverage increases with the acceleration of the Transarctic Current. The correlation between temperature in the Barents Sea and the current velocity northwest of Spitsbergen is $-0,72$. Current velocities at the northern border of the Gulf Stream and the South Equatorial current, and temperature in the Gulf Stream and the Barents Sea have positive trends of interannual variability, while the velocity of the Transpolar Drift Stream and the ice coverage in the Barents Sea show negative ones.

Keywords: sea ice, current velocities, SST, long-term variability, the North European Basin

Acknowledgements. The research was carried out in line with the theme of the state task of the A.O. Kovalovsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS “Functional, metabolic and toxicological aspects of the existence of hydrobionts and their populations in biotopes with different physic-chemical regimes” (121041400077-1), and of the Marine Hydrophysical Institute of RAS “Fundamental studies of processes of interaction in the ocean – atmosphere system which determine the regional spatial-temporal variability of the natural environment and climate” (0555-2021-0002), and financially supported by the Russian Science Foundation (project no 19-17-00110-P).

REFERENCES

- Alekseev G.V., Glock N.I., Smirnov A.V., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V. The Influence of the North Atlantic on Climate Variations in the Barents Sea and Their Predictability, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, no. 8, p. 544–558.
- Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glock N.I. Vliyanie anomalij temperatury okeana v nizkikh shirotah na atmosferyj perenos tepla v Arktiku [Influence of ocean temperature anomalies at low latitudes on atmospheric heat transfer to the Arctic], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2017, vol. 1, p. 106–123, DOI: 10.21513/2410-8758-2017-1-106-123. (In Russian)
- Balmaseda M.A., Mogensen K., Weaver A.T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, vol. 139, no. 674, p. 1132–1161.
- Buettner S., Ivanov V.V., Kassens H., Kusse-Tiuz N.A. Distribution of suspended particulate matter in the Barents Sea in late winter 2019, *Arctic and Antarctic Research*, 2020, vol. 66, no. 3, p. 267–278, DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-267-278.
- Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nature geosciences*, 2014, vol. 7, no. 9, p. 627–637, DOI: 10.1038/ngeo2234.
- Dahlke S., Maturilli M. Contribution of Atmospheric Advection to the Amplified Winter Warming in the Arctic North Atlantic Region, *Advances in Meteorology*, 2017, Article ID 4928620, 8 p., DOI: 10.1155/2017/4928620.
- Hall R.J., Hanna E., Chen L. Winter Arctic Amplification at the synoptic timescale, 1979–2018, its regional variation and response to tropical and extratropical variability, *Climate Dynamics*, 2020, p. 1–17, DOI: 10.1007/s00382-020-05485-y.
- Hu S., Sprintall J., Guan C., McPhaden M., Fan Wang F., Hu D., Cai W. Deep-reaching acceleration of global mean ocean circulation over the past two decades, *Science advances*, 2020, vol. 6, no. 6, p. 1–8, DOI: 10.1126/sciadv.aax7727.
- Krashennnikova S.B., Demidov A.N., Ivanov A.A. Variability of the Characteristics of the Antarctic Bottom Water in the Subtropical North Atlantic, *Oceanology*, 2021, vol. 61, iss. 2, p. 151–158, DOI: 10.1134/S0001437021020090.
- Krashennnikova S.B., Krashennnikova M.A. Prichiny i osobennosti dolgovremennoj izmenchivosti ledovitosti Barentseva morya [Causes and Features of Long-Term Variability of the Ice Extent in the Barents Sea], *Led i sneg*, 2019, vol. 59, no. 1, p. 112–122, DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-112-122. (In Russian)
- Krashennnikova S.B., Shokurova I.G., Shokurov M.V. Winter Currents Velocity and Sea Surface Temperature Anomalies Accompanying the Gulf Stream North Wall Displacements, *Oceanology*, 2020, vol. 60, iss. 1, p. 20–28, DOI: 10.1134/S0001437020010154.
- Leifer I., Chen F.R., McClimans T., Karger F.M. Satellite ice extent, sea surface temperature, and atmospheric methane trends in the Barents and Kara Seas, *The Cryosphere Discussions*, 2018, p. 1–45, DOI: 10.5194/tc-2018-75.
- Matishov G.G., Jenyuk S.L. Morskaya hozyajstvennaya deyatel'nost' v rossijskoj Arktike v usloviyah sovremennykh klimaticheskikh izmenenij [Marine economic activity in the Russian Arctic under present-day climate changes], *Ekologiya i ekonomika*, 2012, vol. 1, no. 5, p. 26–37. (In Russian)
- McCrystall M.R., Hosking J., Maycock A. The impact of changes in tropical sea surface temperatures over 1979–2012 on Northern Hemisphere high-latitude climate, *Journal of Climate*, 2020, vol. 33, no. 12, p. 5103–5121.
- Onarheim I.H., Årthun M. Toward an ice-free Barents Sea, *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, no. 16, p. 8387–8395, DOI: 10.1002/2017gl074304.
- Polonsky A.B., Sukhonos P.A. Evaluation of the heat balance constituents of the upper mixed layer in the North Atlantic, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, vol. 52, no. 6, p. 649–658, DOI: 10.1134/S0001433816060141.
- Russotto R.D., Biasutti M. Polar amplification as an inherent response of a circulating atmosphere: Results from the TRACMIP aquaplanets, *Geophysical Research Letters*, 2020, vol. 47, no. 6, p. e2019GL086771, DOI: 10.1029/2019GL086771.
- Sato K., Inoue J., Watanabe M. Influence of the Gulf Stream on the Barents Sea ice retreat and Eurasian coldness during early winter, *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9, no. 8, p. 084009, DOI: 10.1088/1748-9326/9/8/084009.
- Schlichtholz P. Subsurface Ocean flywheel of coupled climate variability in the Barents Sea hotspot of global warming, *Scientific reports*, 2019, vol. 9, no. 1, p. 1–16, DOI: 10.1038/s41598-019-49965-6.
- Semenov V.A., Martin T., Berens R.K., Latif M., Astafieva E.S. Izmenenie ploshchadi arkticheskikh morskikh

- l'dov v ansamblyah klimaticheskikh modelej CMIP5 i CMIP 3 [Changes in the area of Arctic Sea ice in the ensembles of CMIP5 and CMIP3 climate models], *Led i sneg*, 2017, vol. 57, no. 1, p. 77–107, DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107. (In Russian)
- Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global and planetary change*, 2011, vol. 77, no. 1–2, p. 85–96, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.
- Taboada F.G., Anadón R. Patterns of change in sea surface temperature in the North Atlantic during the last three decades: beyond mean trends, *Climatic Change*, 2012, vol. 115, no. 2, p. 419–431, DOI: 10.1007/s10584-012-0485-6.
- Vorobiev V.N., Kosenko A.V., Smirnov N.P. Mnogoletnyaya dinamika ledovogo pokrova morej zapadnogo sektora Arktiki i ee svyaz' s cirkulyaciej atmosfery i okeana v Severoatlanticheskom regione [Long-term dynamics of the sea ice cover in the western sector of the Arctic and its relationship with the circulation of the atmosphere and the ocean in the North Atlantic region], *Izv. RGO*, 2010, vol. 142, iss. 6, p. 52–59. (In Russian)
- Wu L., Cai W., Zhang L., Timmermann A. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents, *Nature Climate Change*, 2012, vol. 2, no. 3, p. 161–166.
- Yang H., Lohmann G., Wei W., Dima M. Intensification and poleward shift of subtropical western boundary currents in a warming climate, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, vol. 121, no. 7, p. 4928–4945, DOI: 10.1002/2015JC011513.
- Zhichkin A.P. Dinamika mezhgodovykh i sezonnykh anomalij ledovitosti Barentseva i Karskogo morej [Dynamics of interannual and seasonal anomalies in the ice extent of the Barents and Kara seas], *Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN*, 2015, vol. 1, no. 20, p. 55–64. (In Russian)

Received 26.03.2021

Revised 19.06.2021

Accepted 09.03.2022