

УДК 551.465.63

Ю.В. Артамонов¹, Е.А. Скрипалева², Н.В. Никольский³

ВНУТРИГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ

На основе данных реанализа NOAA OI SST рассматриваются особенности среднемноголетней внутригодовой изменчивости поля температуры на поверхности Арктического бассейна в сезонном и синоптическом масштабах времени. Анализируется связь областей экстремальной изменчивости температуры с зонами ее повышенных горизонтальных градиентов. Показано, что уровень сезонной изменчивости температуры выше уровня синоптической на шельфовых участках Арктических морей в 4–6 раз, в открытых районах бассейна – в 2,5–3 раза, во фронтальных зонах – в 1,5–2 раза. В мелководных шельфовых районах бассейна наблюдается самый высокий уровень как сезонной, так и синоптической изменчивости. В открытых районах океана интенсивная синоптическая изменчивость приурочена к областям максимальных горизонтальных градиентов температуры, ее наибольший уровень наблюдается в Западно-Шпицбергенской, Восточно-Гренландской фронтальных зонах и в Полярной фронтальной зоне в районе о-ва Медвежий. Высокий уровень сезонной изменчивости температуры в открытых районах бассейна наблюдается в межфронтальных зонах.

Ключевые слова: Арктический бассейн, температура поверхности океана, среднеквадратическое отклонение, сезонная и синоптическая изменчивость, полный горизонтальный градиент, фронтальные зоны

Введение. Исследования изменчивости структуры вод Арктического бассейна на различных временных масштабах крайне актуальны в связи с тем, что эти изменения оказывают существенное воздействие на региональный климат, тем самым влияя на условия хозяйственно-административной деятельности [Anisimov et al., 2007; Семенов с соавт., 2012]. Большинство публикаций посвящено оценке изменчивости поля температуры, так как этот параметр является индикатором теплосодержания деятельного слоя океана, в значительной степени определяющего протекание крупномасштабных атмосферных процессов [Furevik, 2001; Polyakov et al., 2003; Бойцов, 2007; Walsh et al., 2007; Dmitrenko et al., 2009; Levitus et al., 2009; Ivanov et al., 2009; Бойцов с соавт., 2010; Beszczynska-Möller et al., 2012; Ожигин с соавт., 2016]. Эти исследования в основном относятся к отдельным районам Арктического бассейна. По данным гидрологических измерений было показано, что в Норвежском и Баренцевом морях сезонная изменчивость температуры имеет наибольшие амплитуды в верхнем 200-метровом слое, тогда как в промежуточных и глубинных слоях лучше выражена межгодовая изменчивость [Furevik, 2001]. Согласно результатам численного моделирования, в Баренцевом море сезонной изменчивости подвержен в основном верхний 50-метровый слой [Сидорова, Щербинин, 2004]. Особое внимание уделяется исследованию изменчивости температуры слоя Атлантических вод (АВ), проникающих в Арктический бассейн. На основе архивных данных измерений температуры в центральной части Северного Ледовитого океана и в море Лаптевых показано, что

максимальный уровень изменчивости температуры в слое АВ прослеживается в котловине Нансена [Polyakov et al., 2003], при этом авторы отмечают, что нерегулярные измерения не всегда адекватно отражают фазы арктической изменчивости. В более поздних работах утверждается, что сезонный сигнал в изменчивости температуры слоя АВ на северо-востоке континентального склона моря Лаптевых может достигать 75% [Dmitrenko et al., 2009], а в районе континентального склона Шпицбергена – до 50% общей дисперсии [Ivanov et al., 2009]. В работе [Beszczynska-Möller et al., 2012] отмечено, что в проливе Фрама в стрекне Западно-Шпицбергенского течения отсутствует сезонная изменчивость температуры АВ, в то время как на перифериях течения она велика.

Отметим, что большинство исследований базируется на данных стандартных гидрологических измерений. Их пространственно-временная неоднородность не дает представления об изменчивости поля температуры в Арктическом бассейне в целом и ее региональных особенностях в разных секторах, затрудняет статистические оценки достоверности выявленных закономерностей. В настоящее время появились современные массивы реанализов с высоким пространственно-временным разрешением, в которых усваиваются данные спутниковых и всех существующих контактных измерений температуры. Так, использование реанализов EEWG, GHRSSST OSTIA и NOAA OI SST позволило уточнить многолетнюю изменчивость температуры Арктического бассейна [Swift et al., 2005], проанализировать изменчивость положения температурных

¹ ФГБУН Морской гидрофизический институт РАН, отдел океанографии, вед. науч. с., докт. геогр. н.; e-mail: artam-ant@yandex.ru

² ФГБУН Морской гидрофизический институт РАН, отдел океанографии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: sea-ant@yandex.ru

³ ФГБУН Морской гидрофизический институт РАН, отдел океанографии, аспирант; e-mail: nikolsky.geo@gmail.com

фронтов в июле 2007 г. [Атаджанова с соавт., 2017] и оценить их климатическую сезонную изменчивость [Артамонов с соавт., 2019] на поверхности Баренцева моря. Настоящая работа является продолжением исследований изменчивости поля температуры на основе современных реанализов и направлена на уточнение региональных особенностей среднемноголетней внутригодовой изменчивости поля температуры на поверхности Арктического бассейна в синоптическом и сезонном масштабах времени.

Материал и методы исследований. В работе использовался массив данных реанализа NOAA OI SST [<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>], содержащий среднесуточные значения температуры поверхности океана (ТПО) в узлах регулярной сетки с шагом $0,25^\circ$ за 1982–2016 гг. При создании массива применялся метод оптимальной интерполяции спутниковых и контактных измерений температуры, который позволил получить данные ТПО даже в случае, когда площадь поверхности, свободная ото льда в пределах трапеции $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, составляла всего 5% [Reynolds et al., 2007]. В работе анализировались области, где сплоченность льда не превышала 90%, т. е. площадь свободной ото льда воды была больше 10%. Для анализа уровней внутригодовой изменчивости ТПО в каждом узле сетки рассчитывались ее синоптические и сезонные среднеквадратические отклонения (СКО). В данной работе под синоптической изменчивостью ТПО подразумевается ее изменчивость внутримесячного масштаба. Внутримесячные СКО вычислялись по среднесуточным рядам ТПО для каждого месяца и далее осреднялись за 35 лет для января, февраля и т. д. (среднемесячные $\text{СКО}_{\text{снн}}$) и за все 420 месяцев (среднемноголетнее $\text{СКО}_{\text{снн}}$). Для расчета среднемноголетнего сезонного СКО ($\text{СКО}_{\text{сез}}$) по среднесуточным значениям ТПО были получены временные ряды ее среднемесячных значений, по которым вычислялись внутригодовые СКО ТПО для каждого года и затем осреднялись за 35 лет. Полные горизонтальные градиенты температуры (ПГТ) рассчитывались по среднесуточным значениям ТПО и далее осреднялись за все годы для каждого месяца и по всему временному ряду. Линейные связи уровней сезонной и синоптической изменчивости ТПО с величинами градиентов оценивались как для всей акватории Арктики в целом, так и для отдельных бассейнов.

Результаты исследований и их обсуждение. Пространственные распределения среднемноголетних величин $\text{СКО}_{\text{сез}}$ ТПО (рис. 1 А) и $\text{СКО}_{\text{снн}}$ ТПО (рис. 1, Б) показывают, что общее повышение уровня изменчивости ТПО ($\text{СКО}_{\text{сез}} \sim 2\text{--}3^\circ\text{C}$, $\text{СКО}_{\text{снн}} \sim 0,5\text{--}0,7^\circ\text{C}$) отмечается в шельфовых морях российской и канадской Арктики и вдоль юго-восточного и западного побережий Гренландии. Максимальные значения $\text{СКО}_{\text{сез}}$ ($3,5\text{--}5,5^\circ\text{C}$) и $\text{СКО}_{\text{снн}}$ ($0,7\text{--}1,1^\circ\text{C}$) ТПО наблюдаются на мелководье (на глубинах менее 200–250 м) в Чукотском море, Беринговом проливе

и Беринговом море, у отмелей берегов моря Бофорта, в Гудзоновом заливе, Белом море и южной части Баренцева моря. Здесь наиболее ярко выражены процессы, влияющие на изменчивость ТПО (прогрев и выхолаживание, влияние речного стока, интенсивная прибрежная динамика вод, стонно-нагонные явления, интенсивное взаимодействие Арктических и Тихоокеанских вод через Берингов пролив). На широтных выборках среднемноголетних величин ПГТ, $\text{СКО}_{\text{снн}}$ и $\text{СКО}_{\text{сез}}$ ТПО вдоль отдельных меридианов четко прослеживается увеличение их значений в южных частях профилей, расположенных над мелководным шельфом (рис. 2).

В открытых глубоководных районах Арктического бассейна пространственные распределения уровней сезонной и синоптической изменчивости ТПО заметно различаются. Зоны повышенных значений $\text{СКО}_{\text{сез}}$ (до 2°C), как правило, располагаются в областях пониженных значений ПГТ, т. е. в межфронтальных пространствах (см. рис. 1 А, Г). В областях максимальных значений ПГТ, т. е. во фронтальных зонах, значения $\text{СКО}_{\text{сез}}$ уменьшаются. Аналогичный результат получен в работе [Beszczynska-Möller et al., 2012], в которой отмечен минимум сезонной изменчивости температуры в стрежне Западно-Шпицбергенского течения. Интенсивная синоптическая изменчивость ТПО в открытом океане, наоборот, приурочена к областям высоких значений ПГТ. Наибольшие значения $\text{СКО}_{\text{снн}}$ (до $0,7\text{--}1,0^\circ\text{C}$) наблюдаются в районах Арктического бассейна, где согласно [Родионов, Костяной, 1998; Атаджанова с соавт., 2017; Артамонов с соавт., 2019] располагаются интенсивные фронтальные зоны – Западно-Шпицбергенская (ЗШФЗ), Восточно-Гренландская (ВГФЗ), Полярная ФЗ (ПФЗ) в районе о-ва Медвежий (см. рис. 1 Б). Подобная закономерность была выявлена ранее для районов Гольфстрима и Северо-Атлантического течения [Гулев с соавт., 1988]. На широтных выборках величин ПГТ, $\text{СКО}_{\text{снн}}$ и $\text{СКО}_{\text{сез}}$ ТПО над глубоководными районами экстремумы $\text{СКО}_{\text{сез}}$ ТПО, как правило, смещены по положению относительно экстремумов $\text{СКО}_{\text{снн}}$ ТПО и ПГТ (см. рис. 2). Наблюдается совпадение широтного положения максимумов $\text{СКО}_{\text{снн}}$ ТПО и экстремумов ПГТ, соответствующих Восточно-Гренландскому (ВГФ) (30° з. д.) и Западно-Шпицбергенскому (ЗШФ) (10° в. д.) фронтам, Полярному фронту (ПФ) (30° в. д.) и его Медвежинскому участку (МПФ) (20° в. д.). В открытых районах Арктического бассейна с менее выраженными температурными градиентами на поверхности происходит понижение уровня синоптической изменчивости (не выше $0,5^\circ\text{C}$) (см. рис. 1 Б, Г).

Севернее 80° с. ш. на всей акватории Арктического бассейна наблюдается общее понижение изменчивости ТПО, при этом абсолютный минимум $\text{СКО}_{\text{сез}}$ (ниже $0,5^\circ\text{C}$) и $\text{СКО}_{\text{снн}}$ (ниже $0,3^\circ\text{C}$) отмечается в бассейне Нансена и северной части Канадского бассейна у границы морских льдов 90% балльности (см. рис. 1 А, Б). Отметим, что, согласно [Polyakov et al., 2003] в подповерхност-

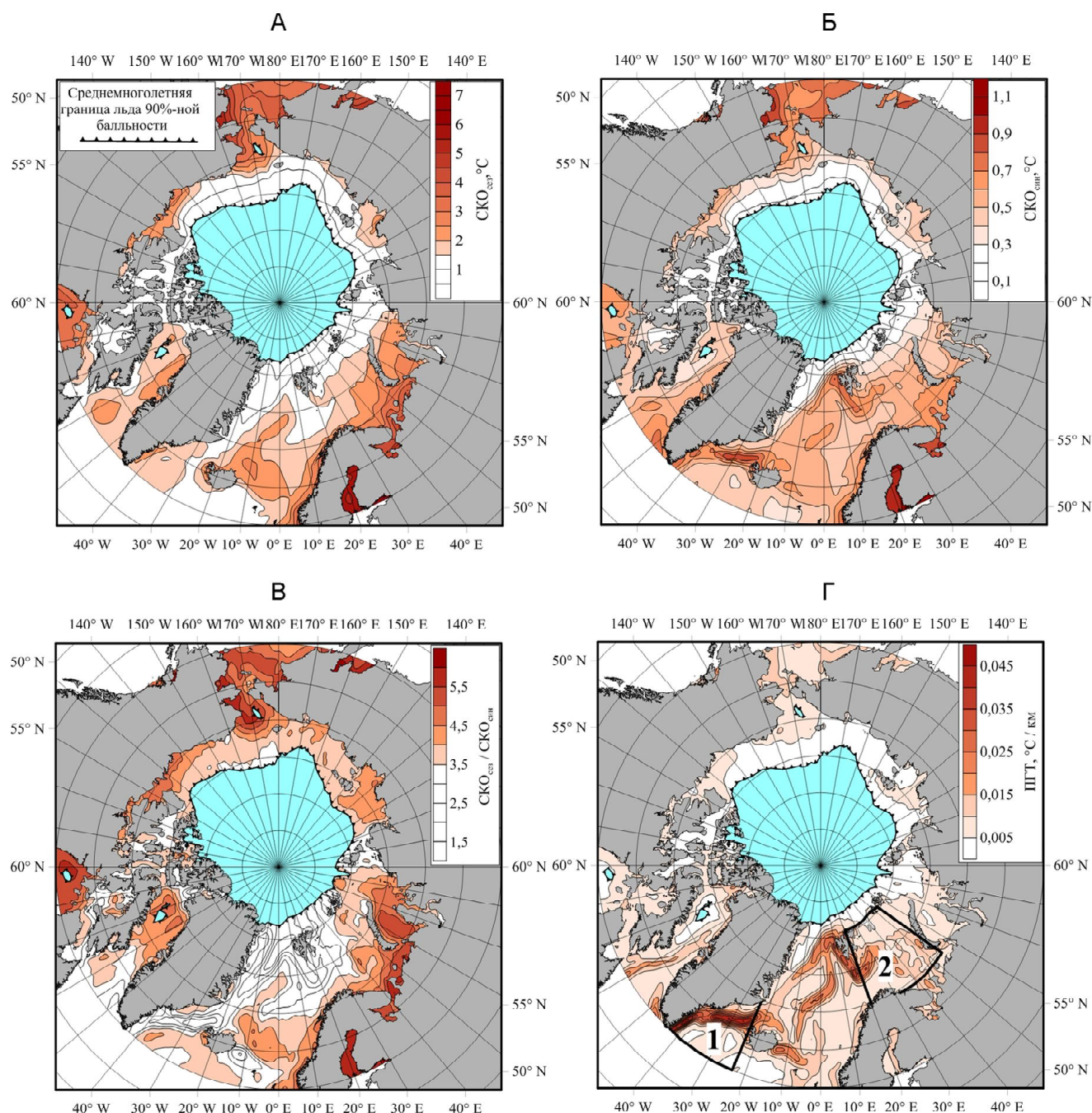


Рис. 1. Пространственные распределения среднееголетних величин $SKO_{сез}$ ТПО (А), $SKO_{син}$ ТПО (Б), отношения $SKO_{сез}/SKO_{син}$ (В), ПГТ (Г). Цифрами 1 и 2 отмечены районы, для которых представлены графики линейной связи $SKO_{сез}$ и $SKO_{син}$ ТПО с ПГТ

Fig. 1. Spatial distributions of long-term average values of seasonal (А) and synoptic (Б) SST root-mean-square deviations (RMSD), $RMSD_{сез}/RMSD_{син}$ relations (В), total horizontal gradients (THG) of SST (Г). The numbers 1 and 2 indicate the regions for which graphs of the linear correlation between SST $RMSD_{сез}$ and THG, SST $RMSD_{син}$ and THG are shown

ном слое Атлантических вод в бассейне Нансена наблюдается максимальный уровень изменчивости температуры.

В целом на акватории Арктического бассейна уровень сезонной изменчивости ТПО в несколько раз превышает уровень ее среднееголетней синоптической изменчивости. Наибольшее значение отношения $SKO_{сез}/SKO_{син}$ (~4–6) наблюдается преимущественно на шельфовых участках Арктических морей. Это отношение уменьшается до 2,5–3 в

открытых районах акватории и до 1,5–2 во фронтальных зонах (см. рис. 1 В).

Распределения среднемесячных величин $SKO_{сез}$ ТПО и ПГТ показывают, что уровень синоптической изменчивости ТПО заметно изменяется в течение года, при этом максимумы $SKO_{син}$ постоянно располагаются в пределах фронтальных зон (рис. 3 А, Б). Анализ внутригодового хода экстремумов ПГТ, соответствующих фронтам, и максимумов $SKO_{син}$ ТПО в зоне этих фронтов показал, что

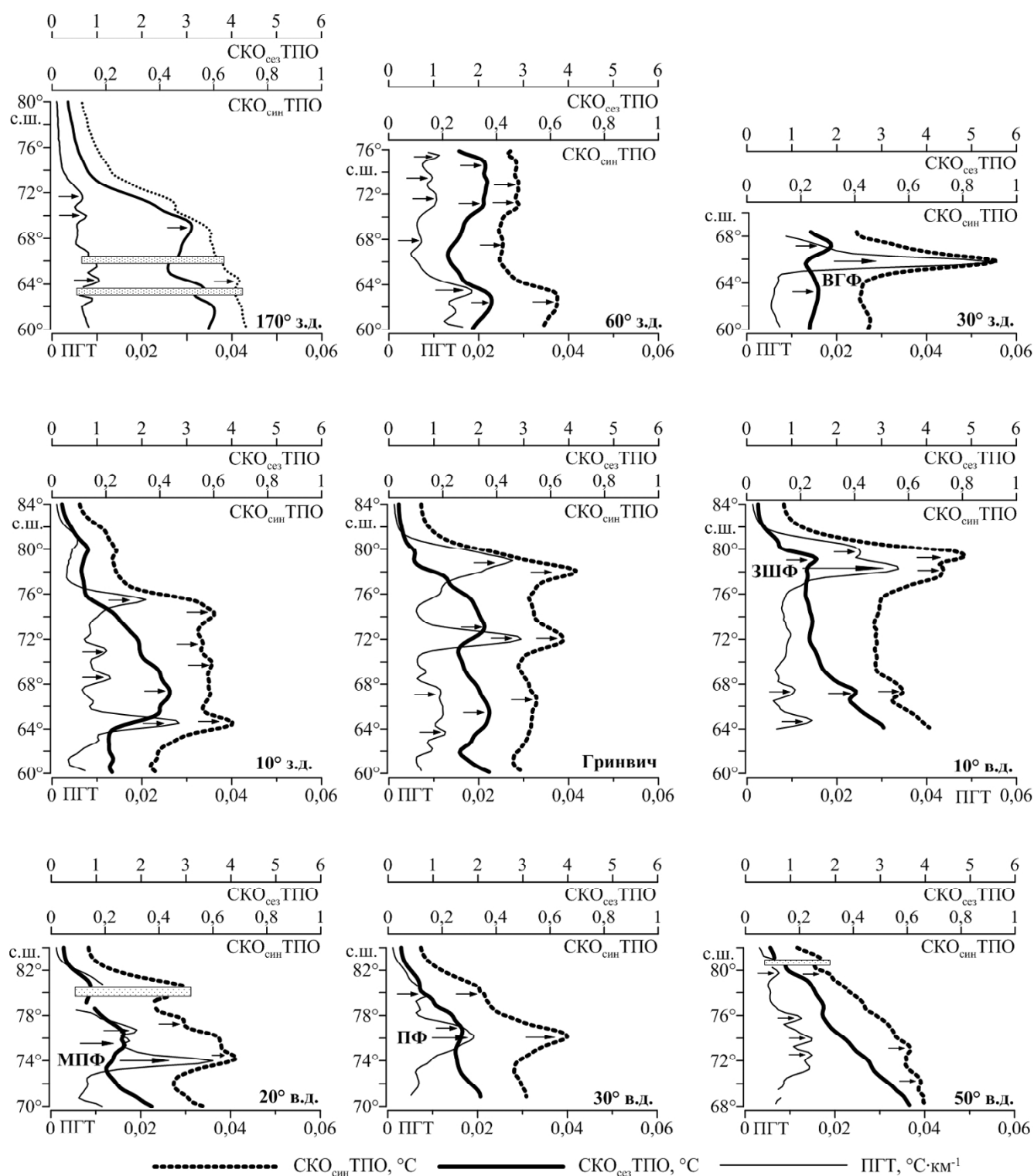
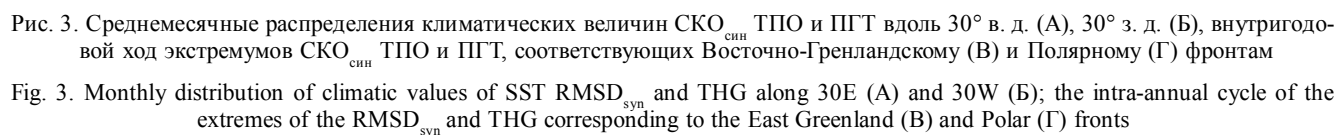


Рис. 2. Широтные распределения среднееголетних величин ПГТ, $SKO_{\text{син}}$ и $SKO_{\text{син}}$ ТПО вдоль отдельных меридианов. Здесь и на рис. 3 стрелками отмечено положение основных экстремумов этих параметров

Fig. 2. Latitudinal distributions of long-term average values of SST THG, SST RMSD_{seas} and RMSD_{syn} along particular meridians. The arrows indicate the position of the main extremes of these parameters (the same at Fig. 3)



изменение уровня синоптической изменчивости ТПО происходит в противофазе с изменением интенсивности фронта. Так, фронт, соответствующий Восточно-Гренландской фронтальной зоне (см. рис. 3 А), наиболее интенсивен в мае, когда уровень синоптической изменчивости ТПО минимален (см. рис. 3 В). Максимум синоптической изменчивости ТПО в зоне фронта наблюдается зимой, когда фронт заметно ослабевает (см. рис. 3 В). Полярный фронт в Баренцевом море (см. рис. 3 Б) наиболее развит в ноябре–декабре, при этом величины $СКО_{\text{снн}}$ ТПО в эти месяцы резко уменьшаются. В период максимума $СКО_{\text{снн}}$ ТПО (июль) Полярный фронт ослабевает (см. рис. 3 Г). Аналогичная закономерность была выявлена для фронтальной системы в поле ТПО северо-западного шельфа Черного моря [Артамонов с соавт., 2017]. Наиболее вероятной причиной повышения уровня синоптической изменчивости ТПО в периоды ослабления температурных фронтов в сезонном цикле является понижение скоростей соответствующих течений. Ослабление циркуляции приводит к усилению синоптического меандрирования и вихреобразования потоков, что обуславливает перестройку поля ТПО и повышение ее изменчивости в синоптическом масштабе времени.

Анализ линейных связей значений ПГТ со среднемноголетними значениями $СКО_{\text{сез}}$ ТПО для акватории Арктического бассейна в целом показал, что связь между ними относительно невысокая, величина коэффициента корреляции R не превышает 0,6 (рис. 4 А). На графике прослеживаются две основные области сгущения точек, характеризующие противоположные тенденции. Одна область показывает увеличение $СКО_{\text{сез}}$ ТПО примерно до 6°C при величинах ПГТ до $0,02^{\circ}\text{C км}^{-1}$ и отражает связь между ними в шельфовых районах, где отмечается повышение уровня сезонной изменчивости ТПО при относительно слабом росте градиентов. Другая область сгущения точек, наоборот, показывает увеличение ПГТ примерно до $0,06^{\circ}\text{C км}^{-1}$ при довольно низких значениях $СКО_{\text{сез}}$ ТПО (до $2,5^{\circ}\text{C}$) и относится к открытым районам бассейна, где в пределах интенсивных фронтальных зон, характеризующихся ростом ПГТ, уровень сезонной изменчивости ТПО остается относительно низким.

Между среднемноголетними значениями ПГТ и $СКО_{\text{снн}}$ ТПО отмечается более высокий уровень связи с величиной порядка 0,81 (см. рис. 4 Б). При этом распределение точек на графике, так же как и в случае сезонной изменчивости, отражает характер связи в шельфовых областях, где наблюдается заметное увеличение $СКО_{\text{снн}}$ ТПО (до 1°C) при слабом росте величин ПГТ (не выше $0,015^{\circ}\text{C км}^{-1}$). Связь между среднемесячными значениями ПГТ и $СКО_{\text{снн}}$ ТПО в Арктическом бассейне значима в течение года. Величины R максимальны в январе–феврале и августе ($\sim 0,85$ – $0,9$), в июне и октябре они понижаются до 0,7 (см. рис. 4 Л).

Уровень линейных связей между ПГТ, $СКО_{\text{сез}}$ и $СКО_{\text{снн}}$ ТПО в разных секторах Арктического бассейна может заметно изменяться. В открытых райо-

нах океана в областях интенсивных фронтальных зон связь между ПГТ и $СКО_{\text{сез}}$ ТПО практически отсутствует, при этом отмечается высокий уровень связи между среднемноголетними значениями ПГТ и $СКО_{\text{снн}}$ ТПО. Так, например, в районе Восточно-Гренландской фронтальной зоны (область 1, см. рис. 1 Г) связь между значениями ПГТ и $СКО_{\text{сез}}$ ТПО незначима ($R \sim 0,22$) (см. рис. 4 В), а величина R между ПГТ и $СКО_{\text{снн}}$ ТПО достигает 0,9 (см. рис. 4 Г). Уровень связи между среднемесячными значениями ПГТ и $СКО_{\text{снн}}$ ТПО в этом районе изменяется в течение года, при этом связь остается значимой (см. рис. 4 Д, Е, М). Величины R возрастают в холодный период с ноября по февраль ($\sim 0,9$ – $0,92$) и заметно понижаются в мае ($\sim 0,6$) (см. рис. 4 М).

В Баренцевом море (область 2, см. рис. 1 Г), где фронты менее интенсивны и наблюдается обширный шельф, связь между среднемноголетними значениями ПГТ и $СКО_{\text{сез}}$ ТПО так же, как и в области ВГФЗ, незначима (см. рис. 4 Ж). В отличие от ВГФЗ уровень связи между $СКО_{\text{снн}}$ ТПО и ПГТ в этом районе понижается, величина R уменьшается до 0,61 (см. рис. 4 З). Так же, как для Арктики в целом, на графиках для Баренцева моря наблюдаются две области сгущения точек, отражающих характер линейных связей $СКО_{\text{снн}}$ ТПО и ПГТ на шельфе и в открытой части моря. Между среднемесячными значениями ПГТ и $СКО_{\text{снн}}$ ТПО в Баренцевом море значимая связь отсутствует с июня по октябрь, с января по апрель ее уровень повышается, и величины R достигают 0,85 (см. рис. 4 И, К, Н).

Выводы:

- наибольший уровень внутригодовой изменчивости ТПО в сезонном и синоптическом масштабах времени наблюдается в мелководных шельфовых районах Арктического бассейна;
- в открытых глубоководных районах интенсивная синоптическая изменчивость ТПО приурочена к областям фронтальных зон, тогда как максимальная сезонная изменчивость наблюдается в межфронтальных пространствах;
- уровень сезонной изменчивости ТПО превышает уровень ее синоптической изменчивости на шельфовых участках Арктических морей в 4–6 раз, в открытых районах бассейна почти в 2,5–3 раза, во фронтальных зонах – в 1,5–2 раза;
- в сезонном цикле максимумы $СКО_{\text{снн}}$ ТПО в зонах фронтов отмечаются в периоды ослабления экстремумов градиентов, соответствующих этим фронтам;
- в целом для акватории Арктического бассейна линейная связь между среднемноголетними значениями $СКО_{\text{сез}}$ ТПО и ПГТ невысокая ($R \sim 0,6$), между ПГТ и $СКО_{\text{снн}}$ ТПО величина R возрастает до 0,81. Связь между среднемесячными значениями ПГТ и $СКО_{\text{снн}}$ ТПО значима в течение всего года и повышается ($R \sim 0,85$ – $0,9$) в январе–феврале и в августе;
- в областях интенсивных фронтальных зон связь между ПГТ и $СКО_{\text{сез}}$ ТПО незначима, а между ПГТ и $СКО_{\text{снн}}$ ТПО отмечается ее высокий уровень ($R \sim 0,85$ – $0,92$).

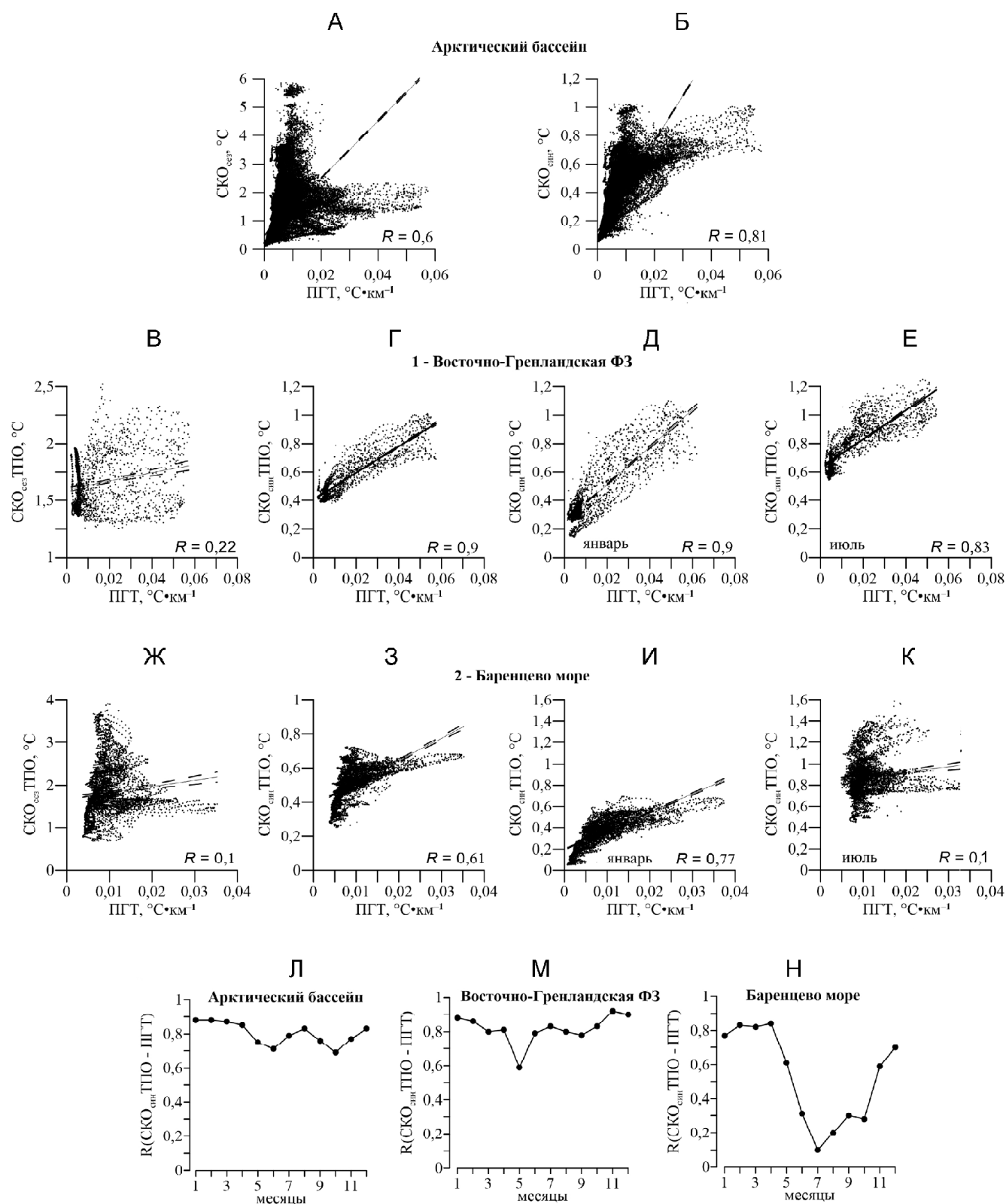


Рис. 4. Графики линейной связи между среднееголетними величинами $СКО_{сез}$ ТПО и ПГТ (А, В, Ж), $СКО_{син}$ ТПО и ПГТ (Б, Г, З), среднемесячными величинами $СКО_{син}$ ТПО и ПГТ (Д, Е, И, К) для Арктического бассейна в целом (А, Б), для района Восточно-Гренландской фронтальной зоны (В–Е) и Баренцева моря (Ж–К); внутригодовые распределения величин R между $СКО_{син}$ ТПО и ПГТ (Л–Н). Штриховые линии – границы 99% доверительных интервалов

Fig. 4. Graphs of linear correlation between long-term average values of $SST\ RMSD_{seas}$ and THG (A, B, Zh), $SST\ RMSD_{syn}$ and THG (Б, Г, З), monthly average values of $SST\ RMSD_{syn}$ and THG (Д, Е, И, К) for the Arctic basin in total (A, B), for the region of the East Greenland frontal zone (B–E) and the Barents Sea (Zh–K); intra-annual distribution of R value between $SST\ RMSD_{syn}$ and THG (Л–Н). Dashed lines are the boundaries of 99% confidence intervals

Благодарности. Исследование выполнено в рамках Государственного задания ФГБУН МГИ № 0827-2018-0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артамонов Ю.В., Колмак Р.В., Скрипалева Е.А., Федирко А.В. Изменчивость поля температуры и температурных фронтов в северо-западной части Черного моря по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 237–245. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-237-245.
- Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Федирко А.В. Сезонная изменчивость температурных фронтов на поверхности Баренцева моря // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 78–90.
- Атаджанова О.А., Зимин А.В., Романенков Д.А., Коник А.А., Свергун Е.И., Мартын К.А., Козлов И.Е. Поверхностные проявления фронтов и малых вихрей в Баренцевом и Карском морях в теплый период года // Материалы конференции «Комплексные исследования Мирового океана». М., 2017. С. 31–33.
- Бойцов В.Д. Изменчивость температуры воды Баренцева моря различных временных масштабов // Вопросы промысловой океанологии. М.: Изд-во ВНИРО, 2007. Вып. 4. № 1. С. 99–113.
- Бойцов В.Д., Карсаков А.Л., Аверкиев А.А., Густов Д.В., Карпова И.П. Исследование изменчивости гидрофизических характеристик по наблюдениям на разрезе «Кольский меридиан» // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2010. № 15. С. 135–149.
- Гулев С.К., Кадеев Д.Г., Яшайев И.М. О синоптической изменчивости температуры поверхности океана в районе Гольфстрима и Северо-Атлантического течения // Океанология. 1988. Т. 28. № 5. С. 721–727.
- Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Анциферов М.Ю. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2016. 260 с.
- Родионов В.Б., Костяной А.Г. Океанические фронты морей Северо-Европейского бассейна. М.: ГЕОС, 1998. 292 с.
- Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. Роль границ морского льда и температуры поверхности океана в изменениях регионального климата в Евразии за последние десятилетия // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 4. С. 403–421.
- Сидорова А.Н., Щербинин А.Д. Внутригодовая изменчивость термохалинной структуры и циркуляции в Баренцевом море по результатам модельных расчетов // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 670–678.
- Anisimov O.A., Vaughan D.G., Callaghan T.V., Furgal C., Marchant H., Prowse T.D., Vilhjálmsson H., Walsh J.E. Polar regions (Arctic and Antarctic). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Eds. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson, Cambridge: University Press, 2007. P. 653–685.
- Beszczynska-Möller A., Fahrbach E., Schauer U., Hansen E. Variability in Atlantic water temperature and transport at the entrance of the Arctic Ocean 1997–2010. *ICES J. Mar. Sci.*, 2012, vol. 69. Iss. 5, p. 852–863. DOI:10.1093/icesjms/fss056.
- Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Ivanov V.V., Woodgate R.A., Polyakov I.V., Koldunov N., Fortier L., Lalande C., Kaleschke L., Bauch D., Hölemann J.A., Timokhov L.A. Seasonal modification of the Arctic Ocean intermediate water layer off the eastern Laptev Sea continental shelf break. *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114. Iss. C6. P. 06010. DOI:10.1029/2008JC005229.
- Furevik T. Annual and interannual variability of Atlantic Water temperatures in the Norwegian and Barents Seas: 1980–1996. *Deep Sea Res.*, Part I, 2001, vol. 48, p. 383–404. DOI:10.1016/S0967-0637(00)00050-9.
- Ivanov V.V., Polyakov I.V., Dmitrenko I.A., Hansen E., Repina I.A., Kirillov S.A., Mauritzen C., Simmons H., Timokhov L.A. Seasonal variability in Atlantic Water off Spitsbergen. *Deep Sea Res.*, Part I, 2009, vol. 56, Iss. 1, p. 1–14. DOI:10.1016/j.dsr.2008.07.013.
- Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I. Barents Sea multidecadal variability. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, vol. 36, L19604. DOI:10.1029/2009GL039847.
- Polyakov I., Walsh D., Dmitrenko I., Colony R.L., Timokhov L.A. Arctic Ocean variability derived from historical observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, vol. 30, no. 6, 1298, p. 31–1–31–4. DOI:10.1029/2002GL016441.
- Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S., Schlax M.G. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *J. Climate*, 2007, vol. 20, p. 5473–5496.
- Swift J.H., Aagaard K., Timokhov L., Nikiforov E.G. Long-term variability of Arctic Ocean waters: Evidence from a reanalysis of the EEWG data set. *J. Geophys. Res.*, 2005, vol. 110. Iss. C03012. DOI:10.1029/2004JC002312.
- Walsh D., Polyakov I.V., Timokhov L.A., Carmack E.K. Thermohaline structure and variability in the eastern Nansen Basin as seen from historical data. *J. Mar. Res.*, 2007, vol. 65, no. 5, p. 685–714. DOI:10.1357/002224007783649466.
- Электронный ресурс
The NOAA Earth System Research Laboratory's Physical Sciences Division. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html> (дата обращения 12.11.2018).

Поступила в редакцию 17.06.2019

После доработки 06.09.2019

Принята к публикации 01.11.2019

Yu.V. Artamonov¹, E.A. Skripaleva²,
N.V. Nikolskii³

INTRA-ANNUAL VARIABILITY OF TEMPERATURE FIELD IN THE ARCTIC BASIN

The long-term mean intra-annual variability of the surface temperature field in the Arctic basin is considered on both seasonal and synoptic time-scales basing on the NOAA OI SST reanalysis data. The association of extreme temperature variability areas with the zones of higher horizontal temperature gradients is analyzed. It was found that the seasonal temperature variability is 4–6 times the synoptic one on the Arctic shelf areas, 2.5–3 times that in the basin open areas, and 1.5–2 times in the frontal zones. The highest seasonal and synoptic variability were observed in shallow shelf areas of the basin. The intense synoptic variability of temperature is typical of the open ocean areas with maximum horizontal temperature gradients. The highest values were observed in the West-Spitsbergen and the East-Greenland frontal zones, as well as in the Polar frontal zone near the Medvezhij Island. High level of seasonal variability in the open deep-sea areas was recorded in the inter-frontal zones.

Key words: Arctic basin, sea surface temperature, root-mean-square deviation, seasonal and synoptic variability, full horizontal gradient, frontal zones

Acknowledgements. The study was carried out under the FSBSI MHI State task № 0827-2018-0003.

REFERENCES

- Anisimov O.A., Vaughan D.G., Callaghan T.V., Furgal C., Marchant H., Prowse T.D., Vilhjálmsson H., Walsh J.E. Polar regions (Arctic and Antarctic). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Eds. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson, Cambridge: University Press, 2007, p. 653–685.
- Artamonov Yu.V., Kolmak R.V., Skripaleva E.A., Fedirko A.V. Izmenchivost' polya temperatury i temperaturnykh frontov v severo-zapadnoj chasti Chernogo morya po sputnikovym dannym [Variability of temperature field and temperature fronts in the northwest part of the Black Sea according to satellite data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 3, p. 237–245. DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-3-237-245. (In Russian)
- Artamonov Yu.V., Skripaleva E.A., Fedirko A.V. Sezonnaya izmenchivost' temperaturnykh frontov na poverhnosti Barentseva morya [Seasonal variability of temperature fronts on the Barents Sea surface]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2019, no. 1, p. 78–90. (In Russian)
- Atadzhanova O.A., Zimin A.V., Romanenkov D.A., Konik A.A., Svergun E.I., Martyn K.A., Kozlov I.E. Poverhnostnye proyavleniya frontov i mal'nykh vikhrej v Barentsevom i Karskom moryakh v teplyj period goda [Surface evidences of fronts and small whirlwinds in the Barents and Kara Seas during the warm period of year]. In Proc. of the conference «Kompleksnyye issledovaniya Mirovogo okeana» [In Proc. of the conference "Integrated Ocean Studies"], Moscow, 2017, p. 31–33. (In Russian)
- Beszczyńska-Möller A., Fahrbach E., Schauer U., Hansen E. Variability in Atlantic water temperature and transport at the entrance of the Arctic Ocean 1997–2010. *ICES J. Mar. Sci.*, 2012, vol. 69, Iss. 5, p. 852–863. DOI:10.1093/icesjms/fss056.
- Boitsov V.D. Izmenchivost' temperatury vody Barentseva morya razlichnykh vremennykh masshtabov [Water temperature variability in the Barents Sea at different time scales]. *Voprosy promyslovoj okeanologii*, Moscow, VNIRO Publ., 2007, vol. 4, no. 1, p. 99–113. (In Russian)
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Averkiev A.A., Gustoev D.V., Karpova I.P. Issledovanie izmenchivosti gidrofizicheskikh harakteristik po nablyudeniyam na razreze «Kol'skij meridian» [Analysis of variability of hydrophysical characteristics according to the «Kola meridian» cross-section observations]. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2010, no. 15, p. 135–149. (In Russian)
- Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Ivanov V.V., Woodgate R.A., Polyakov I.V., Koldunov N., Fortier L., Lalande C., Kaleschke L., Bauch D., Hölemann J.A., Timokhov L.A. Seasonal modification of the Arctic Ocean intermediate water layer off the eastern Laptev Sea continental shelf break. *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, Iss. C6. P. 06010. DOI:10.1029/2008JC005229.
- Furevik T. Annual and interannual variability of Atlantic Water temperatures in the Norwegian and Barents Seas: 1980–1996. *Deep Sea Res.*, Part I, 2001, vol. 48, p. 383–404. DOI:10.1016/S0967-0637(00)00050-9.
- Gulev S.K., Kadeev D.G., Yashayaev I.M. O sinopticheskoy izmenchivosti temperatury poverhnosti okeana v rajone Gol'fstrima i Severo-Atlanticheskogo techeniya [About synoptic variability of the ocean surface temperature in the area of the Gulf Stream and the North Atlantic Current]. *Okeanologiya*, 1988, vol. 28, no. 5, p. 721–727. (In Russian)
- Ivanov V.V., Polyakov I.V., Dmitrenko I.A., Hansen E., Repina I.A., Kirillov S.A., Mauritzen C., Simmons H., Timokhov L.A. Seasonal variability in Atlantic Water off Spitsbergen. *Deep Sea Res.*, Part I, 2009, vol. 56, Iss. 1, p. 1–14. DOI:10.1016/j.dsr.2008.07.013.

¹ FSBSI Marine Hydrophysical Institute of RAS (FSBSI MHI), Oceanography Department, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: artam-ant@yandex.ru

² FSBSI Marine Hydrophysical Institute of RAS (FSBSI MHI), Oceanography Department, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: sea-ant@yandex.ru

³ FSBSI Marine Hydrophysical Institute of RAS (FSBSI MHI), Oceanography Department, postgraduate student; e-mail: nikolsky.geo@gmail.com

Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I. Barents Sea multidecadal variability. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, vol. 36, L19604. DOI:10.1029/2009GL039847.

Ozhigin V.K., Ivshin V.A., Trofimov A.G., Karsakov A.L., Anciferov M.Yu. Vody Barentseva morya: struktura, cirkulyaciya, izmenchivost' [The Barents Sea waters: structure, circulation and variability], Murmansk, PINRO Publ., 2016, 260 p. (In Russian)

Polyakov I., Walsh D., Dmitrenko I., Colony R.L., Timokhov L.A. Arctic Ocean variability derived from historical observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, vol. 30, no. 6, 1298, p. 311–314. DOI:10.1029/2002GL016441.

Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S., Schlax M.G. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *J. Climate*, 2007, vol. 20, p. 5473–5496.

Rodionov V.B., Kostyanov A.G. Okeanicheskie fronty morej severo-evropejskogo bassejna [Oceanic fronts in the seas of the North European basin], Moscow, GEOS Publ., 1998, 292 p. (In Russian)

Semenov V.A., Mohov I.I., Latif M. Rol' granic morskogo l'da i temperatury poverhnosti okeana v izmeneniyah regional'nogo klimata v Evrazii za poslednie desyatiletiya [The role of sea ice

boundaries and ocean surface temperature in the changes of regional climate in Eurasia over the recent decades]. *Izvestia RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2012, vol. 48, no. 4, p. 403–421. (In Russian)

Sidorova A.N., Shcherbinin A.D. Vnutrigodovaya izmenchivost' termohalinnoj struktury i cirkulyacii v Barentsevom more po rezul'tatam model'nyh raschetov [Intra-annual variability of the thermohaline structure and circulation in the Barents Sea according to the results of model calculations]. *Okeanologiya*, 2004, vol. 44, no. 5, p. 670–678. (In Russian)

Swift J.H., Aagaard K., Timokhov L., Nikiforov E.G. Long-term variability of Arctic Ocean waters: Evidence from a reanalysis of the EEWG data set. *J. Geophys. Res.*, 2005, vol. 110, Iss. C03012. DOI:10.1029/2004JC002312.

Walsh D., Polyakov I.V., Timokhov L.A., Carmack E.K. Thermohaline structure and variability in the eastern Nansen Basin as seen from historical data. *J. Mar. Res.*, 2007, vol. 65, no. 5, p. 685–714. DOI:10.1357/002224007783649466.

Web sources

The NOAA Earth System Research Laboratory's Physical Sciences Division. [Elektronnyi resurs]: URL: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html> (access date 12.11.2018).

Received 17.06.2019

Revised 06.09.2019

Accepted 01.11.2019