

Первое появление льда в Северном Баренцевом море обычно происходит в сентябре, однако его сроки значительно варьируют из года в год в зависимости от погоды, температуры моря и других факторов. Морская вода начинает замерзать сначала в проливах ЗФИ и Шпицбергена, а потом между ЗФИ и Новой Землей.

Зимой покрытая льдом акватория расширяется с севера на юг и с востока на запад. Процесс длится до апреля, после чего кромка льда отступает на север и на восток вплоть до сентября. Наиболее быстро лед отступает в июне–июле.

Лед в открытом море, исключая ледовую кромку и прибрежные районы, имеет высокую концентрацию в течение зимы. Однако обширные полыньи часто образуются к югу и юго-западу от ЗФИ, вдоль побережья Новой Земли, вокруг островов Колгуев и Вайгач, в Стур-фьорде. В перечисленных районах полыньи образуются каждый год [Winsor, Bjork, 2000]. Расположение и продолжительность существования полыней зависят от ветра и особенностей рельефа дна.

Морской лед достигает своей максимальной толщины 130–150 см в северной части Баренцева моря к концу зимы. У ледовой кромки толщина льда редко превышает 30 см, в то время как дрейфующий лед в юго-восточной части Баренцева моря может достигать 70–80 см. Размеры ледяных полей в Баренцевом

море невелики, а торосистость высокая. Это происходит из-за активных движений льда в результате действия ветров, течений и приливов.

На севере Баренцева моря встречаются айсберги, которые откалываются от ледников ЗФИ, Новой Земли и Шпицбергена.

Большая часть льда в Баренцевом море образуется в пределах этого района. Впрочем, часть льда приносится из Арктического бассейна через северную границу моря. В среднем в Баренцево море импортируется 40 км³ арктического морского льда каждый год. Однако при определенных условиях объемы вносимого льда могут достигать 340 км³, а выносимого – 280 км³ [Kwok et al., 2005]. Морской лед также довольно часто распространяется на северо-восток Баренцева моря из северо-западной части Карского моря. Меньшее количество льда поступает зимой из Белого моря и из юго-западной части Карского моря через южные проливы Новой Земли.

Изменчивость площади и объема зимнего ледяного покрова Баренцева моря тесно связаны с объемами и температурой поступающих АВ и характеристиками северных ветров. Оба фактора связаны с количеством и интенсивностью циклонов [Sorberberg, Kvingedal, 2006].

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № 0149-2019-0004).

4.2. О климатических изменениях температуры Баренцева моря и их возможных причинах

И.В. Серых, А.Г. Костяной

Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва

Анализ среднемесячных данных температуры Баренцева моря на различных глубинах показал её существенный рост за последние десятилетия. На фоне этого роста обнаружены колебания температуры с периодами, близкими к периодам Эль-Ниньо – Глобальной атмосферной осцилляции, Северо-Атлантического колебания и изменениям Северо-Атлантического течения. Анализ среднесуточных данных температуры поверхности Баренцева моря показал рост амплитуды, количества и продолжительности экстремальных температурных явлений с положительным знаком и сокращение экстремальных температурных явлений с отрицательным знаком за период спутниковых наблюдений.

Ключевые слова: изменения климата, температура, Баренцево море, Эль-Ниньо, Глобальная атмосферная осцилляция, Северо-Атлантическое колебание, Северо-Атлантическое течение, экстремальные явления.

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(14)

ВВЕДЕНИЕ

Для современного климата Земли характерен положительный тренд изменений глобальной приповерхностной температуры, связанный, как сейчас принято

считать, с антропогенным фактором увеличения содержания парниковых газов в атмосфере [IPCC, 2013]. Наряду с этим, после удаления линейного тренда наблюдаются кажущиеся хаотичными изменения темпе-

ратуры, вызванные, по всей видимости, следующими естественными причинами. Во-первых, воздействием на климатическую систему таких внешних квазипериодических сил как: 11-летнее изменение солнечной активности, 14-месячное чандлеровское колебание полюсов Земли, и 18.6-летняя лунно-солнечная нутация оси вращения Земли [Sidorenkov, 2009; Serykh, Sonechkin, 2019]. Во-вторых, глобальными и региональными модами климатической изменчивости: Эль-Ниньо – Глобальной атмосферной осцилляцией [Serykh et al., 2019], Северо-Атлантическим колебанием [Hurrell, Deser, 2009], Тихоокеанским мультидекадным колебанием [Dong, Dai, 2015], Арктическим колебанием и др. В-третьих, перераспределением тепла между верхним деятельным слоем океанов и атмосферой [Byshev et al., 2017]. Все эти факторы могут оказывать влияние на региональные климатические изменения температуры Баренцева моря, исследованию которой и посвящена данная работа.

ДААННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Для исследования температурного режима Баренцева моря анализировались среднемесячные данные температуры воды на 22 различных глубинах от 5 до 446 м океанического ре-анализа ECMWF Ocean Reanalysis System 4 (ORAS4) на сетке $1 \times 1^\circ$ за период 1958–2017 гг. [Balmaseda et al., 2013]. Для анализа экстремальных явлений исследовались среднесуточные данные аномалий температуры поверхности океана (ТПО) NOAAOISST v. 2 High Resolution Dataset на сетке $0.25 \times 0.25^\circ$ за период 1982–2017 гг. [Reynolds et al., 2007]. Среднемесячные данные атмосферного давления на уровне моря (ДУМ) были взяты из ре-анализа NCEP/NCAR на сетке $2.5 \times 2.5^\circ$ за период 1948–2018 гг. [Kalnay et al., 1996].

Производилось усреднение данных для региона Баренцева моря (68° – 80° с. ш.; 20° – 55° в. д.). В каждом узле сетки рассчитывался средний сезонный ход за рассматриваемый период, который затем вычитался из исходных данных для получения аномалий относительно сезонного хода.

Индекс Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО) рассчитывался как алгебраическая сумма нормированных значений аномалий ДУМ в десяти географических районах, совпадающих с экстремумами (максимумами и минимумами) в поле ГАО: (5° ю. ш. – 5° с. ш., 35° – 25° з. д.) + (5° ю. ш. – 5° с. ш., 55° – 65° в. д.) + (55° – 65° с. ш., 95° – 85° з. д.) + (65° – 55° ю. ш., 95° – 85° з. д.) + (5° ю. ш. – 5° с. ш., 145° – 155° в. д.) – (45° – 55° с. ш., 175° – 165° з. д.) – (45° – 55° с. ш., 15° – 5° з. д.) – (55° – 45° ю. ш., 15° – 5° з. д.) – (55° – 45° ю. ш., 175° – 165° з. д.) – (5° ю. ш. – 5° с. ш., 95° – 85° з. д.). При Эль-Ниньо этот индекс является положительным, а при Ла-Нинья – отрицательным.

Индекс Северо-Атлантического колебания, рассчитанный по методу главных компонент для аномалий атмосферного давления на уровне моря Северной Атлантики, был взят из NCAR Hurrell North Atlantic Oscillation Index (PC-based) [Hurrell et al., 2003]. Индекс Северо-Атлантического течения рассчитывался как разность между нормированными аномалиями ТПО между регионами (34° – 39° с. ш.; 58° – 48° з. д.) и (48° – 53° с. ш.; 35° – 25° з. д.).

Линейные тренды рассчитывались методом наименьших квадратов. Для сглаживания и полосовой фильтрации применялся фильтр Баттерворта. Спектры строились методом быстрого преобразования Фурье. Вейвлетное преобразование производилось с применением вейвлетной функции Морле [Torrence, Compo, 1998]. Для вейвлетных кросс-корреляций двух рядов вычислялись произведения их вейвлетных вещественных компонент [Torrence, Webster, 1999].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ изменений аномалий температуры воды Баренцева моря на различных глубинах показал различия между горизонтами 5 и 55 м (рис. 4.2.1). Горизонты от 55 до 207 м отличаются незначительно. С глубиной более 207 м происходит сильное сокращение площади горизонтов, поэтому их сравнение с поверхностью становится затруднительным. Исходя из этого, дальнейшие результаты приводятся для горизонтов 5 и 55 м.

На средних полях температуры воды Баренцева моря для глубин 5 и 55 м хорошо виден заток и распространение на восток теплых вод из Северной Атлантики вдоль Скандинавского побережья и Кольского полуострова [Родионов, Костяной, 1998; Kostianoy et al., 2004] (рис. 4.2.2). Разница температур между западом и востоком Баренцева моря на широтах 70° – 75° с. ш. составляет 5°C . В то время как на широтах 75° – 80° с. ш. разница практически отсутствует.

На глубине 55 м температура меньше, чем у поверхности, также с глубиной сильнее сказывается влияние рельефа дна.

Анализ данных показал существенный рост средней температуры Баренцева моря за последние 60 лет (рис. 4.2.3, 4.2.4), вызванный, по всей видимости, глобальным потеплением климата на планете. Причем у поверхности температура росла быстрее, чем на глубине. Температура Баренцева моря увеличивалась в среднем на 0.2°C за 10 лет, и таким образом за последние 60 лет выросла более чем на 1°C . Наибольший рост температуры имел место в двух регионах Баренцева моря: (75° – 77° с. ш.; 28° – 35° в. д.) и (73° – 76° с. ш.; 45° – 55° в. д.) – вплоть до 0.4°C за 10 лет у поверхно-

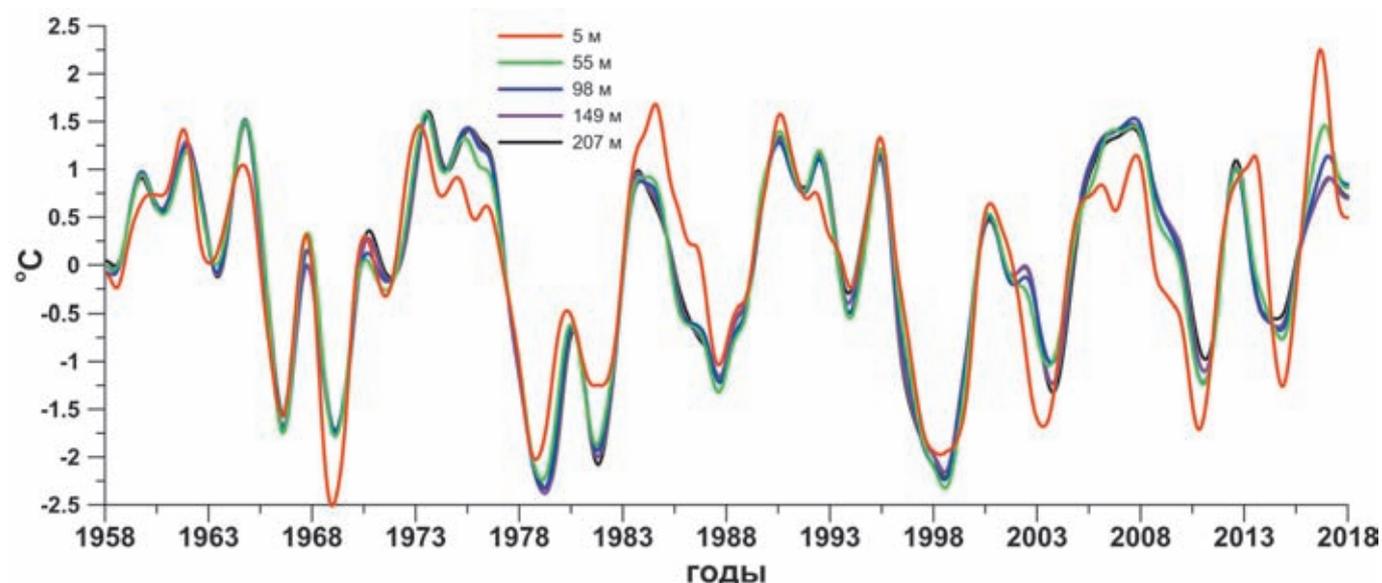


Рис. 4.2.1. Ряды среднемесячных аномалий температуры Баренцева моря на глубинах 5, 55, 98, 149 и 207 м после применения двухлетнего фильтра Баттерворта нижних частот и удаления линейного тренда

сти. По всей видимости, это связано с сокращением в них площади морского льда [Lind et al., 2018].

Сезонный ход у поверхности составляет 6–7°C, а на глубине 55 м 2–3°C (рис. 4.2.4). Интересным представляется тот факт, что в XXI веке средняя температура Баренцева моря не опускалась ниже 0°C как у поверхности, так и на глубине 55 м. Причем летняя температура у поверхности в 2013 и 2016 годах поднималась выше рекордных 8°C. Для анализа межгодовых изменений сезонный ход был исключен из дальнейшего рассмотрения.

На фоне общего роста температуры наблюдается сильная межгодовая изменчивость её аномалий относительно сезонного хода (рис. 4.2.5). Причем изменчивость температуры в теплое время года больше, чем в холодное. Так помимо уже упомянутых летних полугодий 2013 и 2016 гг., аномально теплыми были 1984, 1990 и 1995 гг. Аномально же холодными были летние полугодия 1966, 1968 и 1969 гг. Также наблюдаются сильные аномалии одного знака продолжительностью более одного года. К холодным периодам относятся 1978–1982 и 1997–1999 гг., к теплым периодам – 1973–1976, 1983–1985, 1990–1992 и 2005–2007 гг. Интересным представляется тот факт, что переходы между периодами аномалий противоположных знаков приходится на глобальные климатические сдвиги середины 1970-х и конца 1990-х гг. [Byshev et al., 2017]. Также периоды отрицательных аномалий приурочены к сильнейшим событиям Эль-Ниньо 1982 и 1997 гг. [Бышев, Нейман, 2000].

На энергетических спектрах рядов среднемесячных аномалий температуры Баренцева моря при-

сутствуют формально статистически значимые пики (превосходящие 95% доверительный интервал) на периодах 2,4, 4, 10 и 14 лет (рис. 4.2.6). Поскольку рассматриваемые ряды являются нестационарными, к ним уместно применить вейвлетный анализ.

Расчет вейвлетных преобразований показал, что в межгодовой изменчивости аномалий температуры Баренцева моря выделяются периоды от 2 до 6 лет, от 8 до 10 лет и около 14 лет (рис. 4.2.7). Их можно связать с Эль-Ниньо – Южным колебанием [Вакуленко и др., 2018; Серых, Сонечкин, 2017а, 2017б], Северо-Атлантическим колебанием [Moron et al., 1998] и изменениями Северо-Атлантического течения [Arthun et al., 2017] соответственно. В работе [Serykh et al., 2019] показано, что Эль-Ниньо – Южное колебание является элементом Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО), что объясняет связь столь отдаленных регионов, как тропики Тихого океана и Баренцево море, а также возникновение отрицательных аномалий температуры в Баренцевом море до начала событий Эль-Ниньо. Во время же событий Ла-Нинья (отрицательная фаза ГАО) в Баренцевом море наблюдаются положительные аномалии температуры. Рассмотрим отдельно каждое из отмеченных колебаний.

Взаимосвязь аномалий температуры Баренцева моря с ГАО отображена на рисунке 4.2.8. Наблюдаются периоды рассинхронизации двух рассматриваемых рядов в начале 1950-х гг. и середине 1970-х гг. Период слабых связей начала 1950-х гг. может быть вызван недостаточно подробными и качественными данными наблюдений в это время. Период слабых связей середины 1970-х гг. можно связать с перехо-

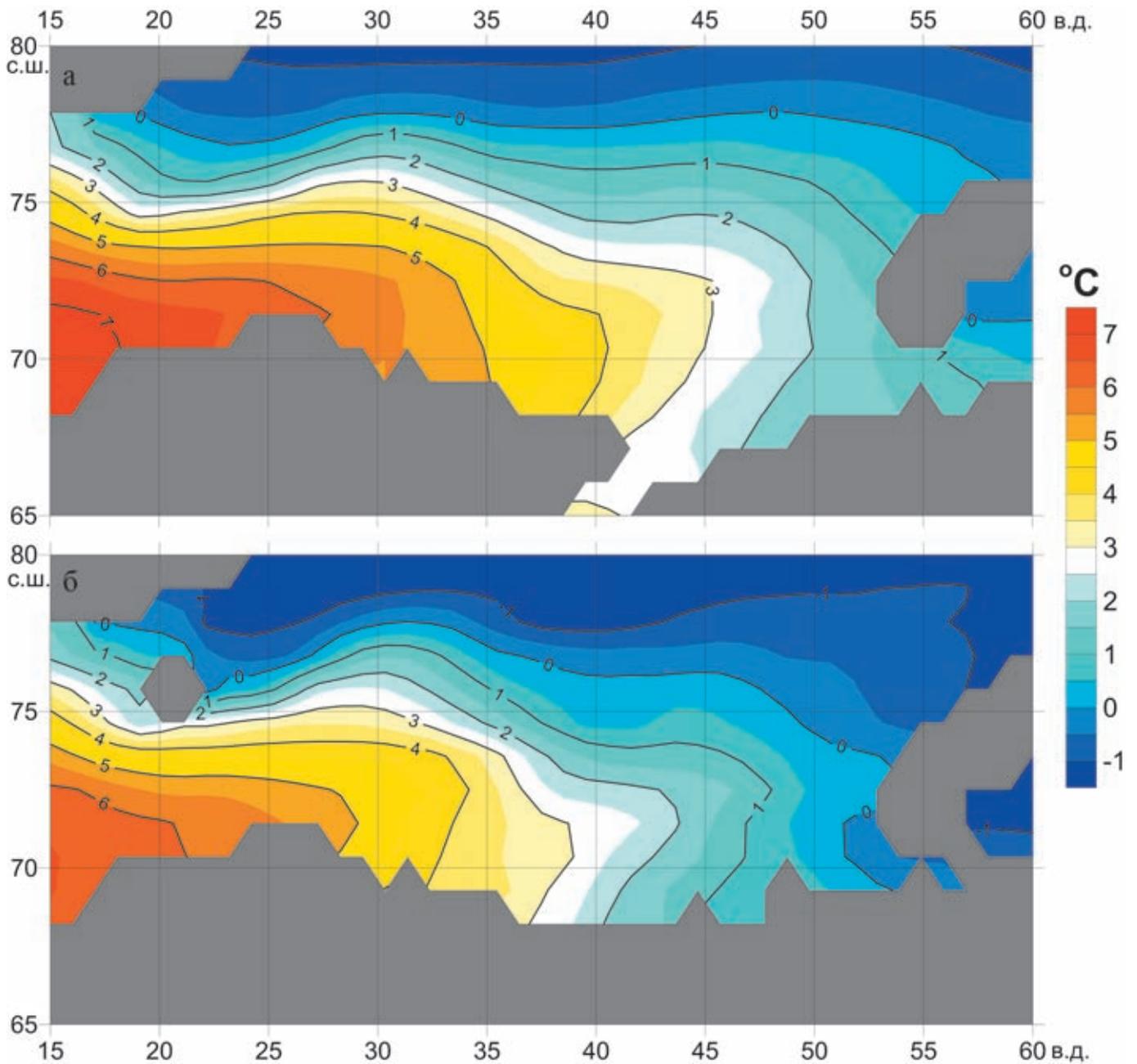


Рис. 4.2.2. Поля средней температуры Баренцева моря на глубинах 5 м (а) и 55 м (б) за 1958–2017 гг.

дом между фазами Тихоокеанской десятилетней осцилляции [Hare, Mantua, 2000]. В остальные периоды наблюдается синхронизация между колебанием температуры Баренцева моря и ГАО. На периодах колебаний то 2 до 4 лет до климатического сдвига середины 1970-х гг. изменения происходили в противофазе, а после середины 1970-х гг. – в фазе. Отметим, что это квазидвухлетнее колебание также является субгармоникой чандлеровского колебания полюсов Земли [Serykh, Sonechkin, 2019]. На периодах колебаний от 4 до 7 лет, до климатического сдвига середины 1970-х гг. изменения были слабо коррели-

рованы, а после сдвига наблюдается сильная противофазная корреляция. Также связь температуры Баренцева моря с ГАО подтверждается присутствием наибольших энергий колебаний около 1998 г., когда произошло сильнейшее событие Эль-Ниньо. В конце 1990-х – начале 2000-х гг. произошел обратный переход между фазами Тихоокеанской десятилетней осцилляции [Bond et al., 2003], что привело к ослаблению отрицательных связей между ГАО и температурой Баренцева моря на периодах колебаний от 4 до 7 лет, зато усилились положительные связи на периодах от 2 до 4 лет.

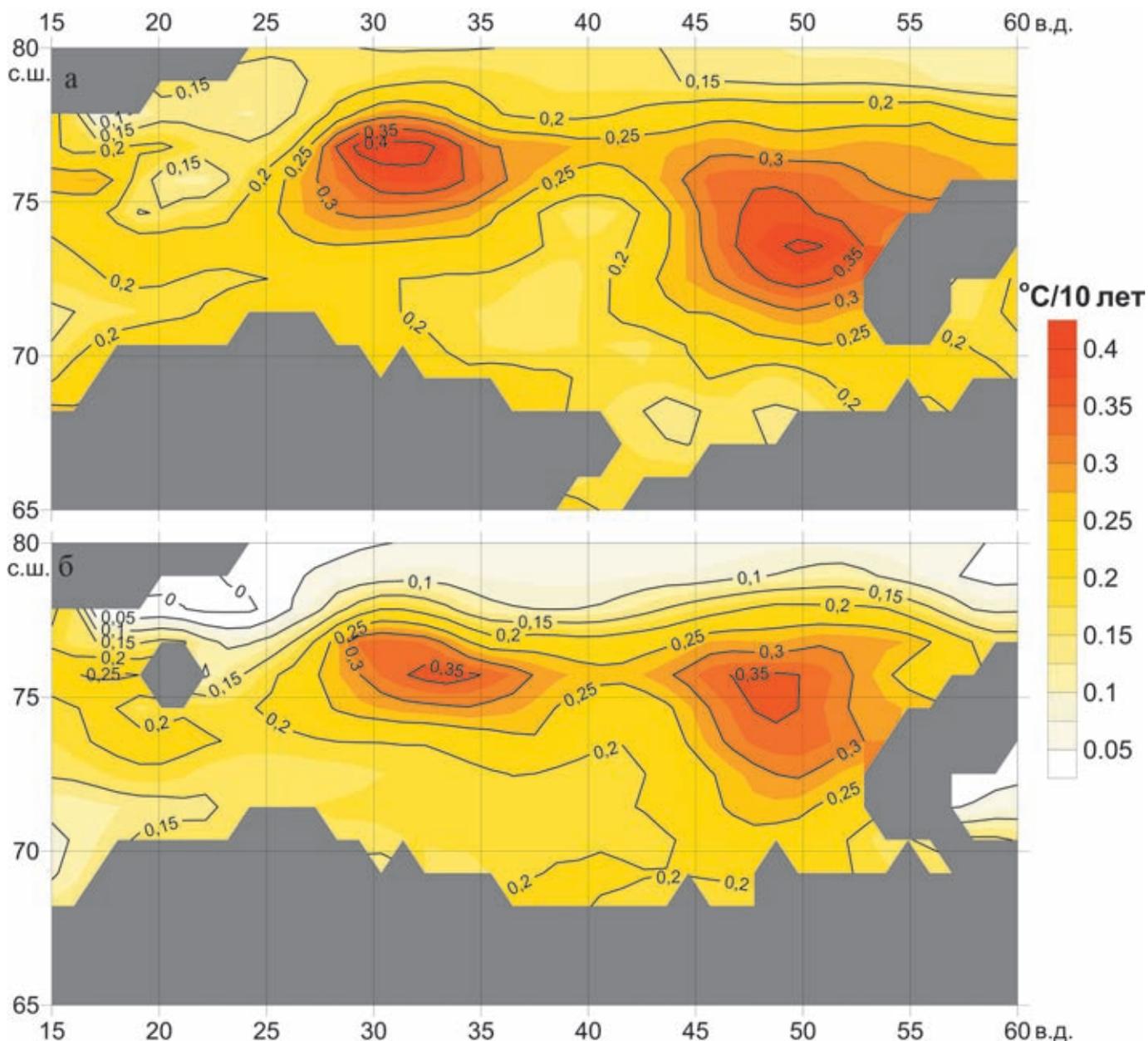


Рис. 4.2.3. Поля изменений среднемесячной температуры Баренцева моря ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет) на глубинах 5 м (а) и 55 м (б), рассчитанные по линейным трендам среднемесячных аномалий за 1958–2017 гг.

Связи аномалий температуры Баренцева моря с Северо-Атлантическим колебанием (САК) показаны на рисунке 4.2.9. Эти связи более стационарны, чем предыдущие, но и для них имеются периоды усиления и ослабления. Вследствие глобального климатического сдвига середины 1970-х гг. произошла смена фаз САК, что привело к изменениям количества циклонов и приповерхностной температуры в Северной Атлантике, а также выноса тепла из этого региона на Евро-азиатский континент [Jung et al., 2003]. Это хорошо прослеживается и на кросс-вейвлетной диаграмме (рис. 4.2.9), где наиболее сильные кросс-корреляции на квази-восьмилетнем периоде просле-

живаются с середины 1970-х по конец 1990-х гг. Отличительной особенностью этого периода является опережение изменений САК изменениям температуры Баренцева моря.

Связи аномалий температуры Баренцева моря с изменениями Северо-Атлантического течения показаны на рис. 4.2.10. Для них характерен квази-четырнадцатилетний период колебаний [Arthun et al., 2017], который прослеживается на кросс-вейвлетной диаграмме (рис. 4.2.10). К сожалению, длины рассматриваемых рядов явно недостаточно для достоверных оценок этих междекадных колебаний.

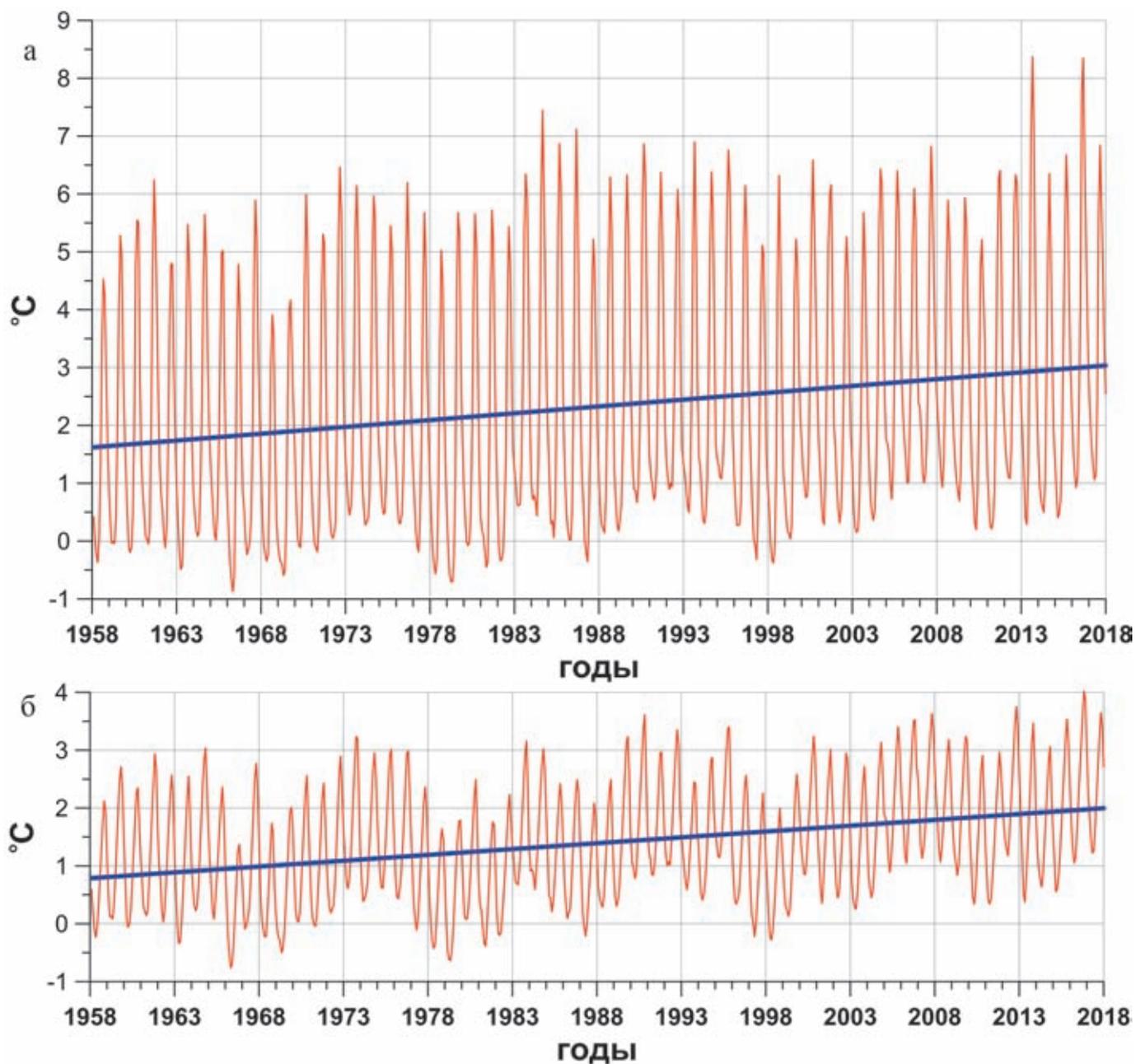


Рис. 4.2.4. Изменения среднемесячных значений температуры Баренцева моря (красный) и их линейный тренд (синий) на глубинах 5 м (а) и 55 м (б)

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии планетарных и региональных мод климатической изменчивости на межгодовые и междекадные изменения аномалий температуры Баренцева моря.

По среднесуточным аномалиям температуры поверхности (ТПО) Баренцева моря для каждого года было рассчитано количество экстремальных температурных событий, превосходящих по модулю своими аномалиями одно среднеквадратическое отклонение исследуемого ряда за период спутниковых

наблюдений (1982–2017 гг.), а также изменения средней амплитуды и продолжительности этих экстремальных событий. Методом наименьших квадратов для положительных и отрицательных экстремальных событий рассчитаны линейные тренды, аппроксимирующие изменения их количества, средней амплитуды и продолжительности. Анализ результатов показал рост экстремальных температурных явлений с положительным знаком и сокращение явлений с отрицательным знаком за период спутниковых наблюдений (рис. 4.2.11).

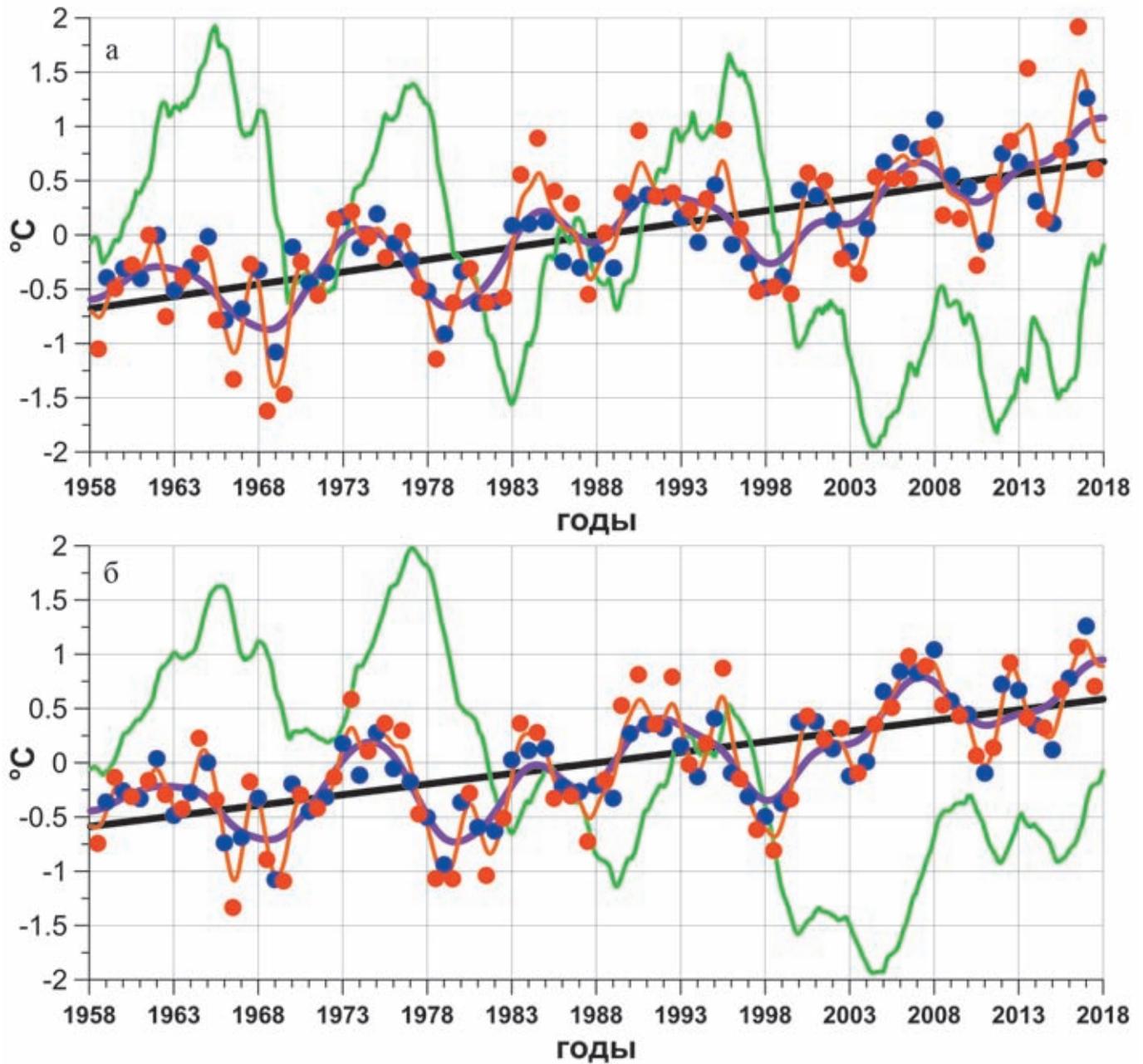


Рис. 4.2.5. Изменения среднемесячных аномалий температуры Баренцева моря на глубинах 5 м (а) и 55 м (б), сглаженных двухлетним (оранжевый) и семилетним (фиолетовый) фильтрами Баттерворта нижних частот.

Их линейный тренд (черный) и накопленная сумма аномалий после удаления линейного тренда (зеленый). Кругами отмечены средние значения аномалий для теплого (май–октябрь) (красный) и холодного (ноябрь–апрель) (синий) полугодий

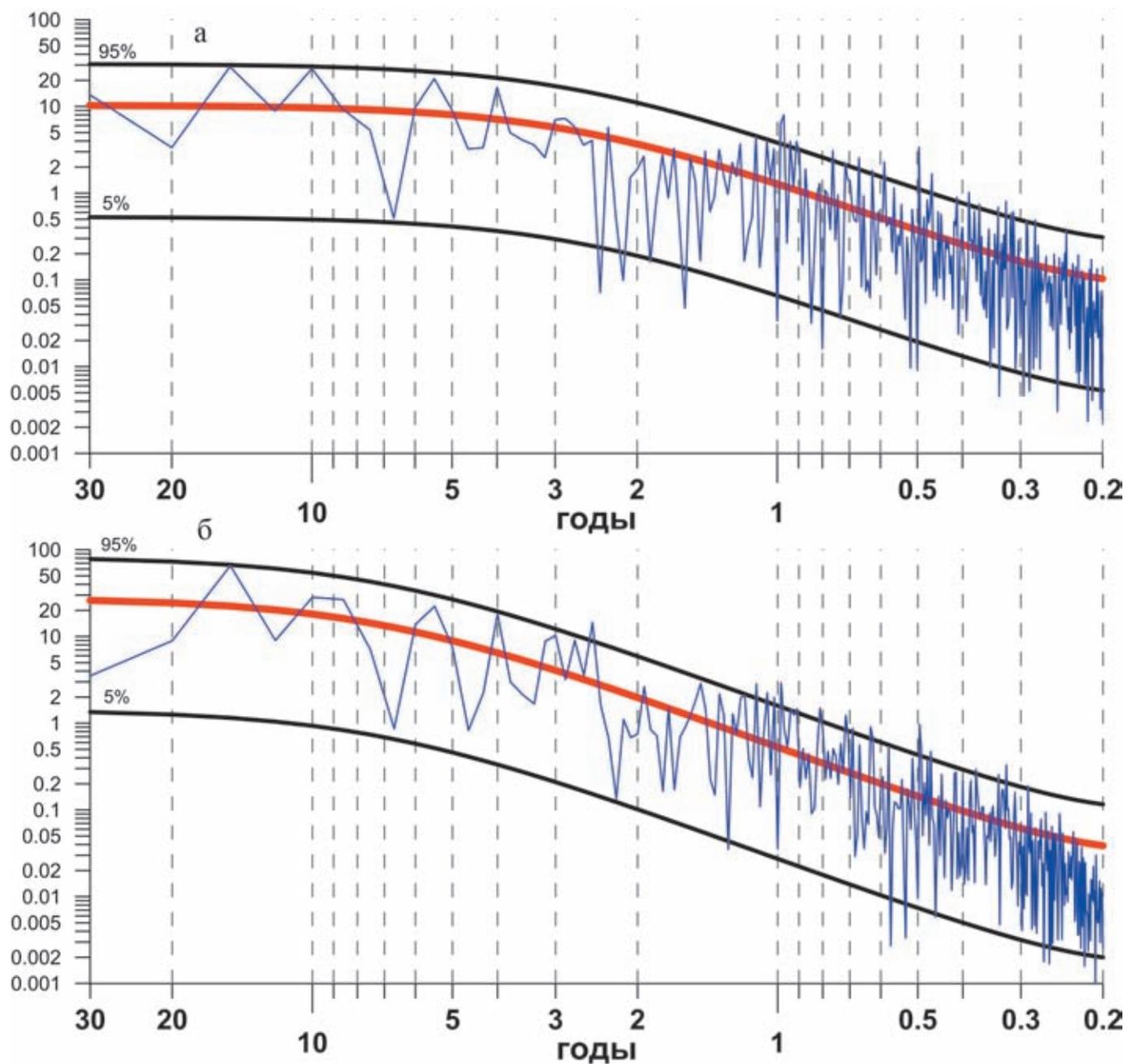


Рис. 4.2.6. Энергетические спектры рядов среднемесячных аномалий температуры Баренцева моря (синий) на глубинах 5 м (а) и 55 м (б) за 1958–2017 гг.

Отмечен доверительный интервал 5–95% (черные линии) и спектр красного шума (красная линия). Произведено предварительное нормирование рядов на их среднеквадратические отклонения

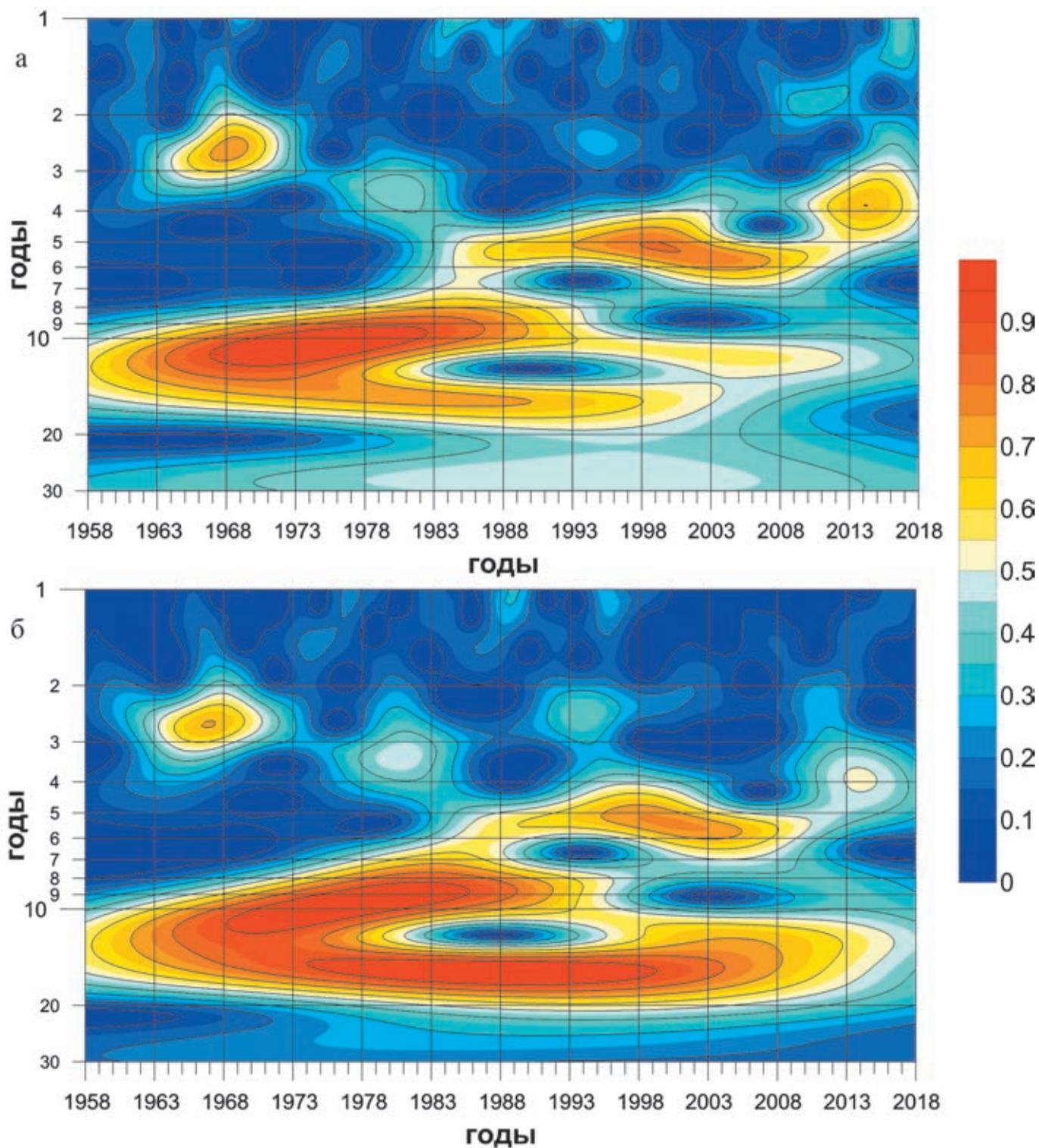


Рис. 4.2.7. Картины вейвлетного преобразования рядов среднемесячных аномалий температуры Баренцева моря на глубинах 5 м (а) и 55 м (б).
Произведено предварительное нормирование рядов на их среднеквадратические отклонения

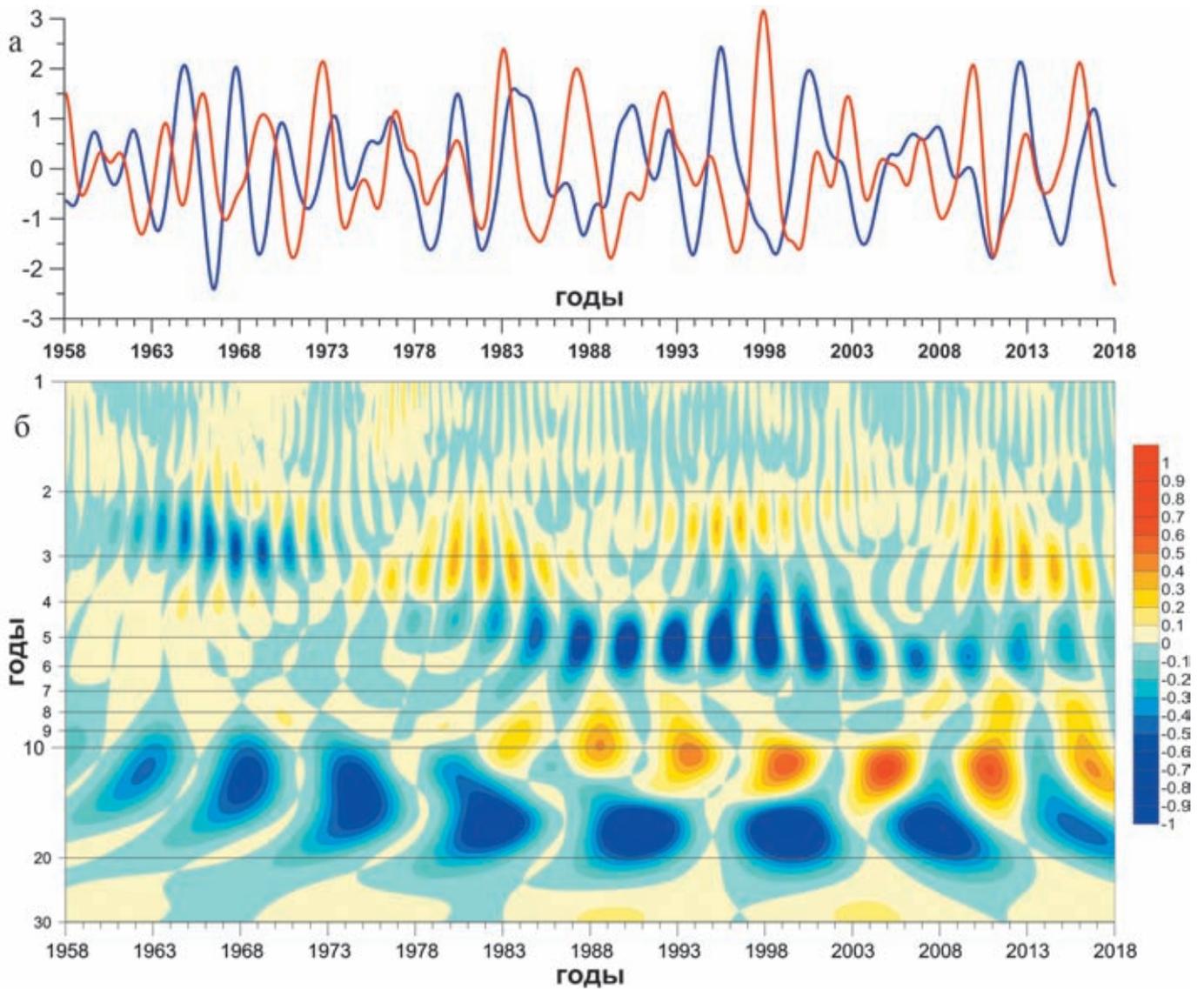


Рис. 4.2.8. Ряды индекса Глобальной атмосферной осцилляции (красный) и среднемесячных аномалий температуры Баренцева моря (синий) на глубине 55 м после применения полосового фильтра Баттерворта от 2 до 7 лет (а), и картины кросс-корреляций их вещественных преобразований без фильтрации (б).

Произведено предварительное удаление линейных трендов, центрирование и нормирование рядов на их среднеквадратические отклонения

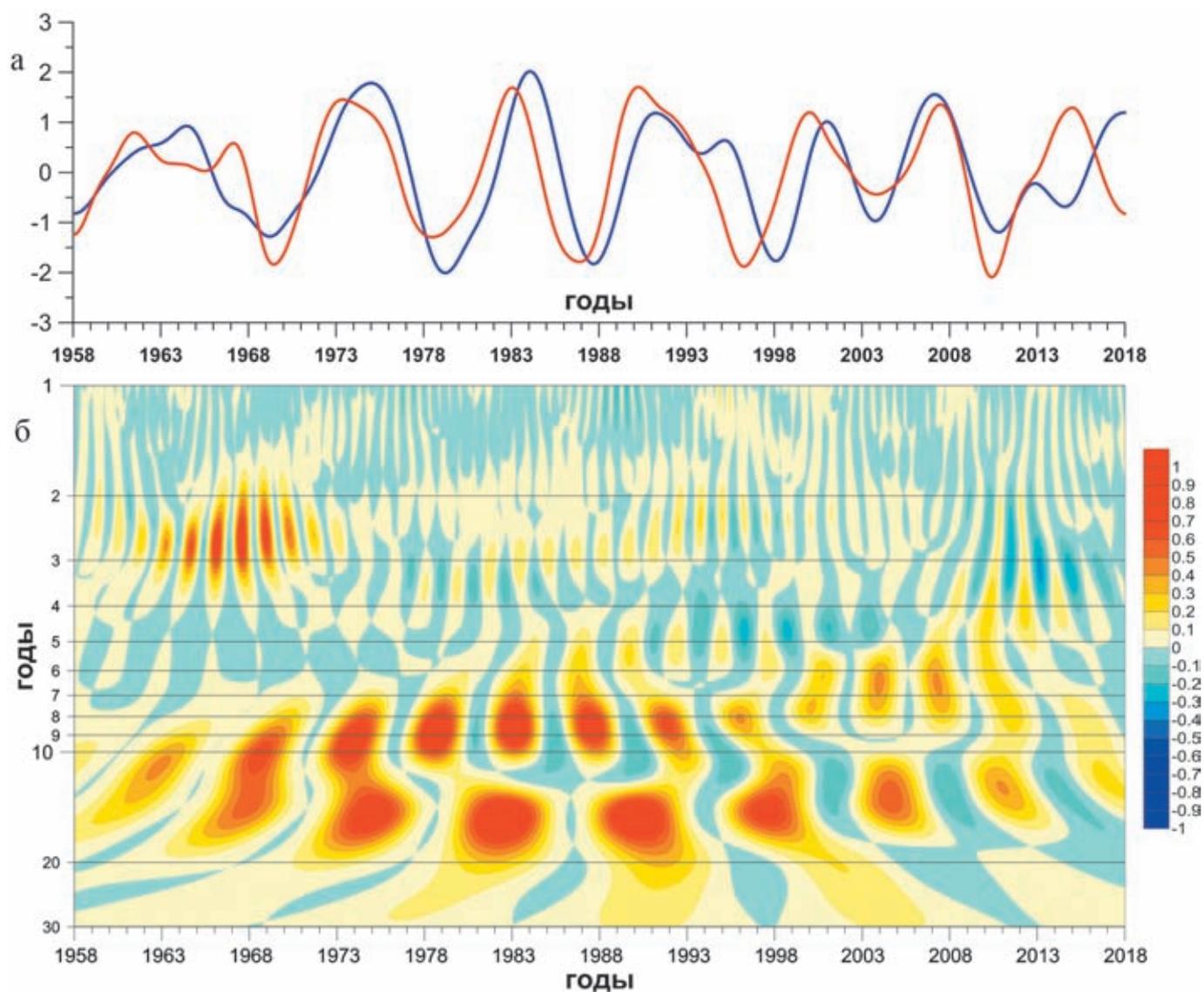


Рис. 4.2.9. Ряды индекса Северо-Атлантического колебания (красный) и среднемесячных аномалий температуры Баренцева моря (синий) на глубине 55 м после применения полосового фильтра Баттерворта от 7 до 10 лет (а), и картины кросс-корреляций их вещественных преобразований без фильтрации (б).

Произведено предварительное удаление линейных трендов, центрирование и нормирование рядов на их среднеквадратические отклонения

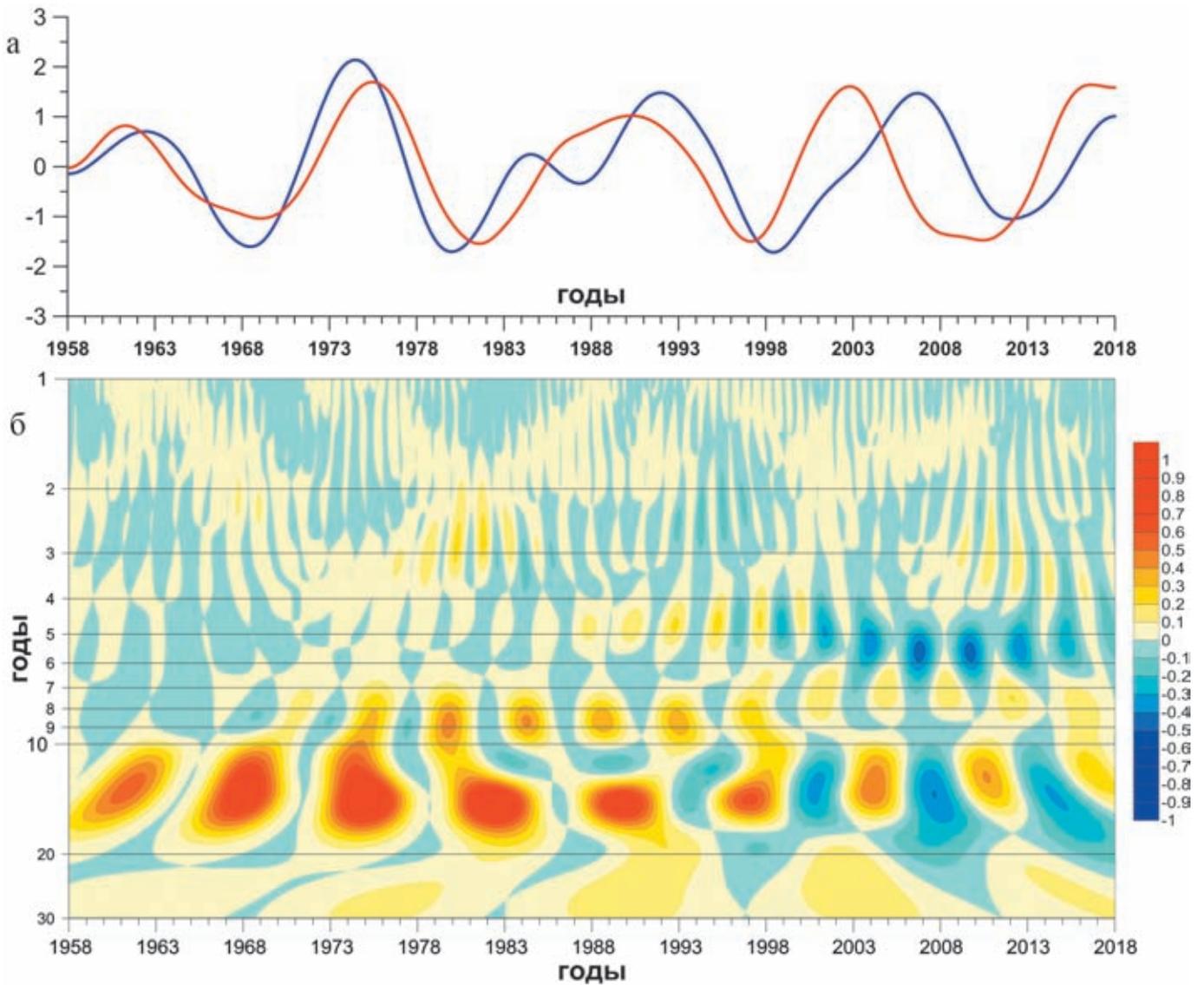


Рис. 4.2.10. Ряды индекса Северо-Атлантического течения (красный) и среднемесячных аномалий температуры Баренцева моря (синий) на глубине 55 м после применения полосового фильтра Баттерворта от 12 до 16 лет (а), и карты кросс-корреляций их вещественных преобразований без фильтрации (б).

Произведено предварительное удаление линейных трендов, центрирование и нормирование рядов на их среднеквадратические отклонения

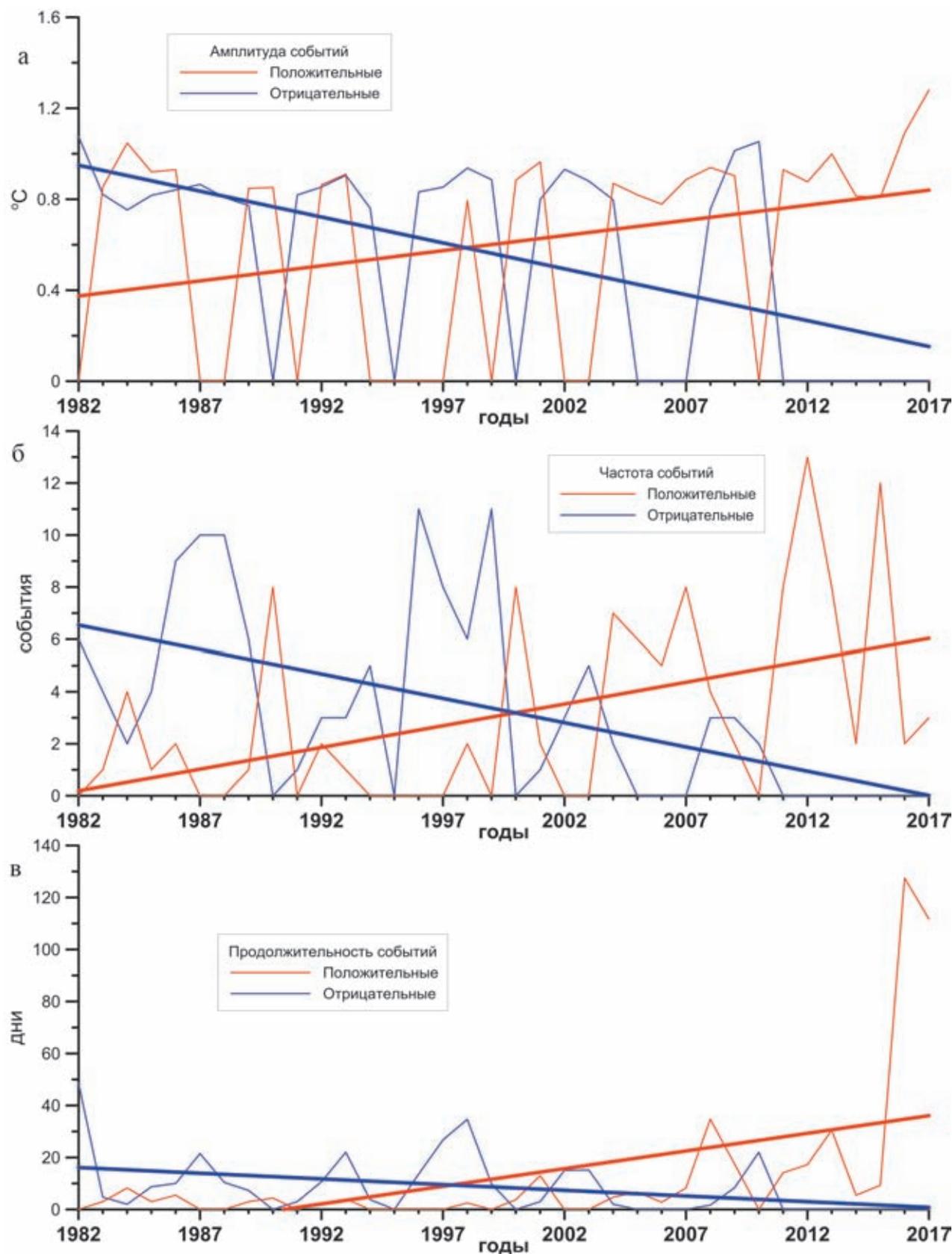


Рис. 4.2.11. Ежегодные изменения средней амплитуды (а), количества (б) и средней продолжительности (в) экстремальных явлений с положительными (красный) и отрицательными (синий) среднесуточными аномалиями температуры поверхности Баренцева моря, превосходящими одно стандартное отклонение, и их линейные тренды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ среднемесячных данных температуры Баренцева моря на поверхности и различных глубинах показал её существенный рост (в среднем на 0.2°C за 10 лет) за последние десятилетия.

На фоне этого роста обнаружены колебания температуры на периодах, близких к 3, 8 и 14 годам. Выдвинуто предположение о связи этих изменений с Эль-Ниньо – Глобальной атмосферной осцилляцией, Северо-Атлантическим колебанием и изменениями Северо-Атлантического течения соответственно.

Показано, что аномалии температуры затрагивают верхний 55-метровый слой Баренцева моря.

Анализ среднесуточных данных температуры поверхности Баренцева моря показал рост амплитуды, количества и продолжительности экстремальных температурных явлений с положительным знаком и их сокращение с отрицательным знаком за период спутниковых наблюдений.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-80065).

4.3. Закономерности и особенности ледовых условий Баренцева моря во второй половине XX – начале XXI века

И.О. Думанская

ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва

Потепление Арктики, особо активизировавшееся в начале XXI века, сопровождается значительным уменьшением площади ледяного покрова в арктических морях. В разделе показаны количественные изменения ледовых параметров Баренцева моря, а также факторов, влияющих на формирование ледяного покрова в последние годы. В XXI веке повторяемость мягких зим увеличилась на 17%, а суровых уменьшилась на 19%. Существенно увеличилась температура воздуха на ГМС Малые Кармакулы, температура воды на разрезе «Кольский меридиан», атмосферный и океанский потоки тепла, а также скорость течений на западной границе Баренцева моря. Продолжительность ледового периода сократилась в среднем на 2–3 недели, а скорость уменьшения ледовитости составляла 7.2% за 10 лет. Это наибольшая скорость по сравнению с другими арктическими морями. Показано, что изменчивость ледовитости Баренцева моря и других параметров природной среды региона носит циклический характер. Период цикла предположительно близок к 84 годам, что соответствует орбитальному периоду Урана. Минимум ледовитости после 1935–1945 гг. ожидается в период 2019–2029 гг.

Ключевые слова: ледовый покров, ледообразование, ледовитость, температурный режим.

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(15)

ВВЕДЕНИЕ

Основными факторами, влияющими на ледовый покров в Баренцевом море, являются:

1. Воздействие теплых атлантических вод (АВ), приносимых ответвлениями течения Гольфстрим (в виде северной, центральной и южной ветвей Нордкапского течения), которое определяет тот факт, что Баренцево море, в отличие от всех других арктических морей, даже в суровые зимы полностью не покрывается льдом.

2. Изменчивость температурного режима региона.

3. Ветер, активность которого влияет на перемешивание воды и, следовательно, на скорость выхолаживания поверхностного слоя, в зависимости от которой находятся сроки начала ледообразования. Преобладающая повторяемость в холодный период юго-западных и западных ветров в южной и западной частях моря способствует восточному по-

ложению кромки льда, кроме того, с этими ветрами связано появление заприпайных полыней (средней шириной 15–30 км) вдоль материкового побережья юго-восточной части Баренцева моря. С преобладающей повторяемостью в холодный период ветров восточной четверти в северных районах моря связано появление заприпайных полыней вдоль западного и юго-западного побережья архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ). Кроме того, под действием восточных ветров из центральной Арктики в районы, прилегающие к ЗФИ и Шпицбергену, могут поступать довольно мощные арктические льды и сохраняться в отдельные годы в виде остаточных в течение всего летнего периода [Гидрометеорология, 1990; Карелин, Карклин, 2015; Наблюдения..., 2009; Думанская, 2014].

Эти факторы в течение многих веков оказывают влияние на эволюцию ледяного покрова Баренцева