© Бышев В.И., Анисимов М.В., Гусев А.В., Сидорова А.Н., 2021, Океанологические исследования, 2021, Том 49, № 4, С. 3–23

УДК 551.465 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(4).1

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СТРУКТУРЫ МУЛЬТИДЕКАДНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ МИРОВОГО ОКЕАНА

Бышев В.И.[1], Анисимов М.В.[1], Гусев А.В.[1,2], Сидорова А.Н.[1]

[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: labbyshev@ocean.ru
[2]Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН,
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 8,
e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.ru
Статья поступила в редакцию 06.09.2021, одобрена к печати 29.11.2021.

Одной из наиболее примечательных особенностей современного климата, несомненно, следует признать климатический сдвиг, наблюдавшийся в середине 70-х годов прошлого века. Причины подобного явления долгое время, несмотря на активизацию климатологов всего мира, оставались загадкой, требующей своего раскрытия. Прежде всего, это было вызвано тем, что произошедший сдвиг оказался для ученых неожиданным и сопровождался быстрыми качественными изменениями планетарного климата. К настоящему времени, благодаря усилиям ученых, использующих результаты стремительно развивающегося численного моделирования, диагностические расчеты и материалы наблюдений в крупных гидрофизических экспериментах в различных районах Мирового океана (МО), сложилось понимание роли океанического фактора в изменчивости текущего климата. Стало понятно, что климатические сдвиги – это важная особенность внутренней динамики климатической системы. Наиболее очевидным свидетельством внутрисистемных процессов следует рассматривать обнаруженные планетарные структуры в атмосфере – Глобальная Атмосферная Осцилляция (ГАО) и в океане – Мультидекадная ОСцилляция Теплосодержания Океана (МОСТОК), квазисинхронно сопровождающие вариации современного климата. Структура и особенности ГАО были детально рассмотрены ранее в ряде исследований. Что же касается МОСТОК, то ее структура и особенности обсуждаются в предлагаемой работе. Характерно то, что МОСТОК расположен в слое главного термоклина (100–600 м). В квазиоднородном слое (0–100 м) и в глубинном слое (600–5500 м) термодинамический режим отличается от режима в слое главного термоклина. Возможно, именно это обстоятельство не позволило ранее обратить внимание на подобную важную деталь в структуре термодинамической изменчивости МО. Наличие экстремальных мультидекадных возмущений поля температуры на промежуточных уровнях (200, 300, 400, 500, 600 м) следует отметить в качестве важной характерной особенности осцилляции. Крупномасштабные гидрофизические эксперименты (Полигон-70, ПОЛИМОДЕ и др.) позволили выявить в динамике вод МО вихревую структуру и обнаружить, что вихри открытого океана обладают максимумами кинетической энергии именно в слое главного термоклина. Это позволяет допустить связь между синоптической вихревой активностью и МОСТОК. Однако, последнее еще предстоит изучить.

Ключевые слова: Мировой океан (МО), осцилляция теплосодержания океана, главный термоклин, фазовая изменчивость, климатическая система, современный климат, численное моделирование

Введение

Одной из наиболее примечательных особенностей современного климата, несомненно, следует признать климатический сдвиг, наблюдавшийся в середине 70-х годов прошлого века (Minobe, 1999; Ponomarev et al., 2001; McCabe et al., 2001; Yamasaki, Nanawa, 2002; Lee, McPhaden, 2008; Lyman et al., 2010). Причины подобного явления долгое время, несмотря на активизацию климатологов всего мира, оставались загадкой, требующей раскрытия. Прежде всего, это было вызвано тем, что произошедший сдвиг оказался для ученых неожиданным и сопровождался быстрыми качественными изменениями планетарного климата. К настоящему времени, благодаря усилиям ученых, использующих результаты стремительно развивающегося численного моделирования (IPCC, 2007; IPCC, 2013; Серых, 2017), диагностические расчеты (Бышев, Фигуркин, Анисимов, 2016) и материалы наблюдений в крупных гидрофизических экспериментах (Атлантический гидрофиз. Полигон-70, 1974; Атлас ПОЛИМОДЕ, 1986; Гидрофизические исследования по программе Мезополигон, 1988; Эксперимент МЕГАПОЛИГОН, 1992) в различных районах Мирового океана (МО), сложилось понимание роли океанического фактора в изменчивости текущего климата. Стало понятно, что климатические сдвиги – это важная особенность внутренней динамики климатической системы. Наиболее очевидным свидетельством внутрисистемных процессов следует рассматривать обнаруженные планетарные структуры в атмосфере – Глобальная Атмосферная Осцилляция (ГАО) (Serykh et al., 2019; Романов и др., 2019; Neiman et al., 2018; Серых и др., 2018) и в океане – Мультидекадная ОСцилляция Теплосодержания Океана (МОСТОК) (Byshev et al., 2017), квазисинхронно сопровождающие вариации современного климата. Структура ГАО и ее особенности детально были рассмотрены ранее, например, в (Serykh and Sonechkin, 2020).

В предлагаемой работе рассматривается вопрос о роли МО в формировании структуры временных возмущений современного климата. При этом океанический фактор наблюдаемой в XX – начале XXI-го столетиях короткопериодной изменчивости (мультидекадной ритмики) климата рассматривается нами в качестве важнейшего источника. На справедливость подобного утверждения указывают как разнонаправленные тенденции приповерхностной температуры воздуха над континентами и океанами (Бышев, Нейман, Романов, 2005; Бышев, Нейман, Романов, 2006), так и квазисинхронные фазовые вариации теплосодержания вод ВДС МО в информативных районах (Byshev et al., 2017) и глобального климата (Bond et al., 2003; Бышев и др., 2011; Пономарев и др., 2018) на мультидекадных временных масштабах.

Выявленная мультидекадная ритмика (Бышев, Нейман, Романов, 2016) климата обладает характерными особенностями, которые представляют исключительный интерес: это кажущаяся внезапность и стремительность смены одной фазы климата на другую, качественно отличной от предыдущей. Изучение отмеченного процесса

в динамике современного климата было основано на использовании и численного моделирования (Byshev et al., 2017), и диагностических расчетов (Бышев, Фигуркин, Анисимов, 2017), и экспериментальных данных (Бышев, Орлов, 1993; Бышев, Снопков, 1990; Бышев, Усыченко, 1995).

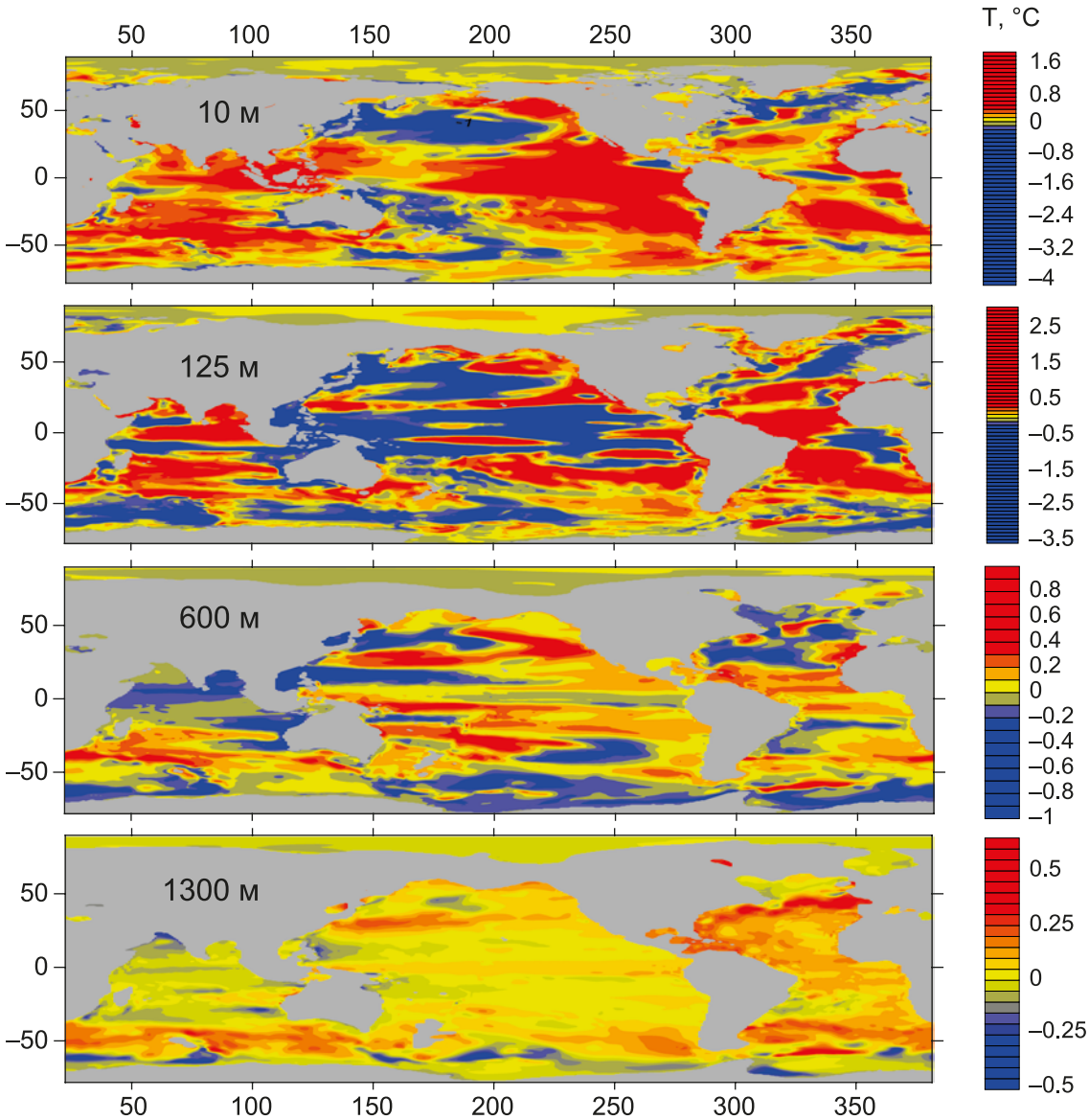

Рис. 1. Аномалии температуры воды МО (°С) на горизонтах 10, 125, 600 и 1300 м в фазу климата 1974–1999 гг., характеризующие термодинамическое состояния МО

Открытие планетарных структур – в атмосфере (Бышев и др., 2014) ГАО (Глобальная Атмосферная Осцилляция), а в океане (Бышев и др., 2020) МОСТОК (Мультидекадная ОСцилляция Теплосодержания Океана), сопровождающих наблюдаемую фазовую ритмику текущего климата, являются логическим оформлением проведенных поисковых исследований. Вместе с тем ряд вопросов, заслуживающих внимания, требует развития этих исследований.

Основная проблема, которую следует обсудить, заключается в том, чтобы показать, что МОСТОК, представляющая собой совокупность положительных и отрицательных аномалий теплосодержания ВДС, создавая случайную мозаичную картину МО (рис. 1), обусловлена существованием отдельных океанов со своими границами и рельефом.

Естественно, что это требует от исследователя определенной готовности принимать МОСТОК в подобной реализации.

Материалы и методы

Исследование выполнено на основе результатов воспроизведения циркуляции МО и ее климатической изменчивости в период с 1948 по 2007 гг. (Гусев, Дианский, 2014) по модели ИВМ РАН (INMOM) (Дианский, 2013).

Наиболее близка тематике воспроизведения характеристик общей циркуляции океана международная программа Coordinated Ocean-ice Reference Experiments (CORE). Ее целью является исследование циркуляции МО и ее изменчивости на основе мультимодельного подхода, при котором все модели, участвующие в сравнении, должны использовать одинаковые сценарии экспериментов и одни и те же исходные данные для расчета атмосферного воздействия. Первая серия расчетов CORE-I (Griffies et al., 2009) посвящена воспроизведению среднеклиматического квазистационарного состояния океана и морского льда, а вторая – CORE-II (Danabasoglu et al., 2013) – их межгодовой изменчивости, при этом проводится сравнение результатов моделирования с комплексом разнородных данных наблюдений. В настоящей работе представлены результаты экспериментов с моделью общей циркуляции океана (МОЦО) INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model), проведенных в рамках CORE-II.

В качестве начальных условий задавалось отсутствие снега и льда, состояние покоя МО и среднеянварские климатические температура и соленость, интерполированные на модельную область, из данных атласа Левитуса (Levitus et al., 1998), имеющих пространственное разрешение 1/4° на 33 стандартных океанографических горизонтах. Такой подход позволяет сократить время интегрирования модели для получения реалистичной циркуляции до 50–60 лет, поскольку поля температуры и солености содержат значительную часть информации о динамике океана, в то время как при старте с однородного термохалинного состояния требуется несколько тысяч лет расчета, чтобы с использованием предписанных характеристик атмосферы достичь состояния, близкого к реальному.

Согласно сценарию CORE-II (Danabasoglu et al., 2013) интегрирование модели было проведено на пять последовательных 60-летних циклов, соответствующих периоду с 1948 по 2007 гг. Это обусловлено тем, что важнейшим атрибутом климатической системы являются долгосрочные колебания, из которых одно из наиболее выраженных имеет период около 60 лет. Таким образом, была

сделана попытка воссоздать достаточно реалистичную эволюцию атмосферных характеристик и, как следствие, адаптацию к ней гидротермодинамики океана. Для проведения экспериментов при расчете атмосферного воздействия использовалась специальная база CORE (Large, Yeager, 2009) приповерхностных атмосферных характеристик, в основе которой лежат данные реанализа NCEP/NCAR. Атмосферные характеристики CORE включают в себя температуру воздуха, влажность и скорость ветра на высоте 10 м и атмосферного давления на уровне моря (временной интервал 6 ч); длинноволновую и коротковолновую радиации (временной интервал 24 ч); среднемесячные атмосферные осадки и сток рек. Расчет потоков тепла, солености и импульса на поверхности океана осуществлялся согласно балк-формулам (см., например, (Дианский, 2013)). Сток рек рассчитывался в виде псевдоосадков, сосредоточенных в акваториях, примыкающих к устьям рек.

Поскольку для температуры на поверхности океана существует естественная отрицательная обратная связь с предписанной температурой воздуха через поток явного тепла, коррекция потока тепла на поверхности океана не проводилась. Для солености же такой обратной связи не существует. Поэтому осуществлялась привязка поверхностной солености к климатическим данным (Levitus et al., 1998) путем введения в поток солености на поверхности моря релаксационной добавки, представляющей собой разность модельной и климатической приповерхностной солености, умноженной на коэффициент равный 1.5×10^{-4} см/с, что можно трактовать как релаксацию модельной солености, осредненной по 10-метровому верхнему слою, к климатическим значениям с временным масштабом около 80 суток. Необходимость коррекции потока солености на поверхности моря объясняется также тем, что точность задания осадков и стока рек недостаточно высока.

Согласно сценарию CORE-II, являющемуся обязательным требованием для всех моделей – участниц этого проекта (Danabasoglu et al., 2013), результаты последнего пятого 60-летнего цикла рассматриваются как основные данные, характеризующие изменчивость циркуляции МО за период с 1948 по 2007 гг.

Качество численного моделирования сопоставлялось с диагностическими расчетами (Бышев и др., 2017) и с локальными данными, полученными в гидрофизических экспериментах: Полигон-70 (Северная Атлантика, 1970), ПОЛИМОДЕ (Северная Атлантика, 1977–1978), МЕГАПОЛИГОН (северная часть Тихого океана, 1987) и Атлантэкс-90 (Северная Атлантика, 1990) (Бышев, 2003). Перечисленные выше гидрофизические эксперименты проводились группами научно-исследовательских судов, которые производили комплексные инструментальные наблюдения термодинамического состояния океана в пределах заданных акваторий. Это позволило оценить фазовые климатические характеристики состояния океана в определенных районах в периоды проведения экспериментов. Сопоставление модельных результатов и данных наблюдений позволило убедиться в их удовлетворительном согласовании.

Результаты

Особенности эволюции термической структуры МО в период с 1948 по 2007 гг. можно видеть на рис. 2–4, на которых представлены изменения теплосодержания МО в слое 0–5500 м (рис. 2): в его верхнем – 0–1000 м (рис. 3) и глубинном – 1000–5500 м (рис. 4) слоях. Теплосодержание МО (рис. 2) демонстрирует рост, прерываясь в 50–60-е и 80–90-е годы. В верхнем 1000-метровом слое МО изменение теплосодержания вод (рис. 3) испытывает мультидекадное возмущение относительно некоторого критического уровня, а в глубинном (1000–5500 м) слое (рис. 4) оно в течение всего рассматриваемого периода возрастает. Наблюдаемая двухслойность структуры эволюции теплосодержания МО свидетельствует о наличии двух различных режимов и источников подобной изменчивости.

Оценки эволюции теплосодержания в верхнем 1000-метровом слое с более детальным вертикальным разрешением (по 100-метровым слоям) позволяют выявить некоторые важные детали мультидекадной перестройки вертикальной термической структуры ВДС МО. Теплосодержание приповерхностного 100-метрового слоя в период с 1948 по 2007 гг. демонстрировало тенденцию роста (рис. 5).

В нижележащих слоях, по крайней мере, в слое 100–600 м (рис. 6), теплосодержание в указанный период сокращалось. Далее, в слое 600–1000 м (рис. 7) теплосодержание в это же время последовательно перестраивалось с режима определенного сокращения (100–600 м) на режим с признаками его роста. Если верхний квазиоднородный слой (0–100 м) МО океана преимущественно отражает сезонные изменения, хорошо коррелируемые с процессами в пограничном слое атмосферы, то промежуточному слою (100–600 м) в большей степени свойственны процессы, происходящие в главном термоклине, в котором сосредоточены основные системы течений: Гольфстрим, Куросио, Антарктическое Циркумполярное и др., а, следовательно, вертикальные и горизонтальные изменения температуры, солености и плотности, где в силу геострофических соотношений наблюдаются основные изменения по вертикали горизонтальных скоростей течений (Океанология. Физика океана. Т. 1, 1978).

В приповерхностном квазиоднородном слое (рис.1, горизонт 10 м) выделяются районы, где в период с 1975 по 1999 гг. происходило выхолаживание вод МО. Очаги крупномасштабного выхолаживания ВДС проявились в северных частях Атлантического и Тихого океанов, в тихоокеанском секторе Южного океана, а также на акватории, примыкающей на востоке к австралийскому континенту.

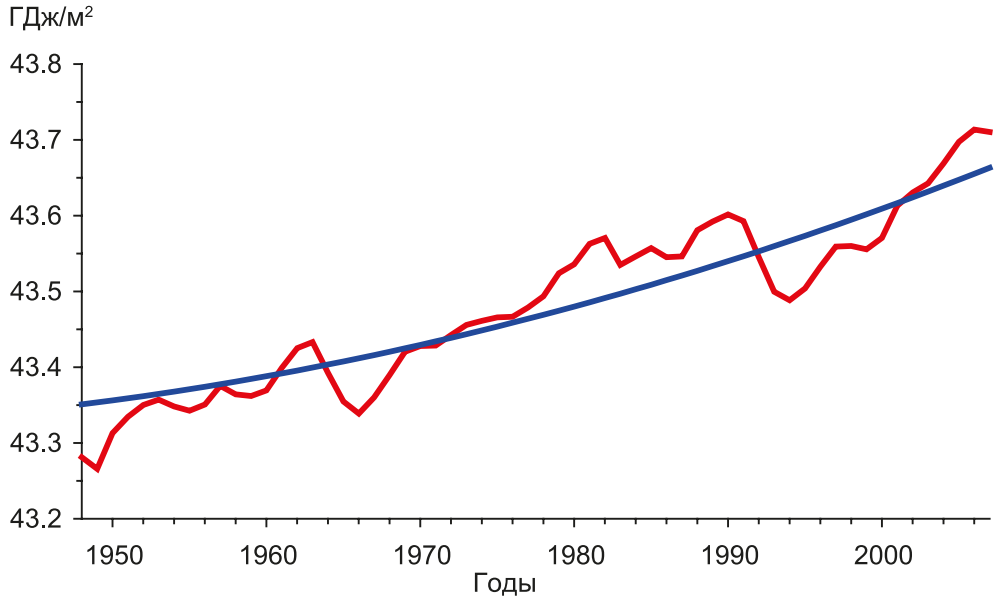

Рис. 2. Эволюция теплосодержания МО и её квадратичный тренд в период 1948–2007 гг. в слое 0–5500 м

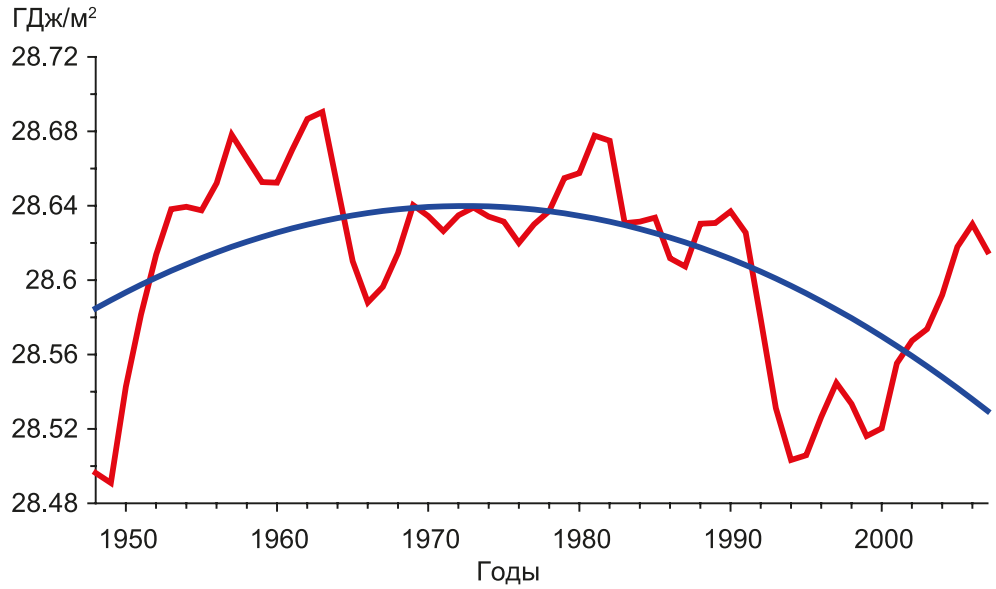

Рис. 3. Эволюция теплосодержания МО и её квадратичный тренд в период 1948–2007 гг. в слое 0–1000 м

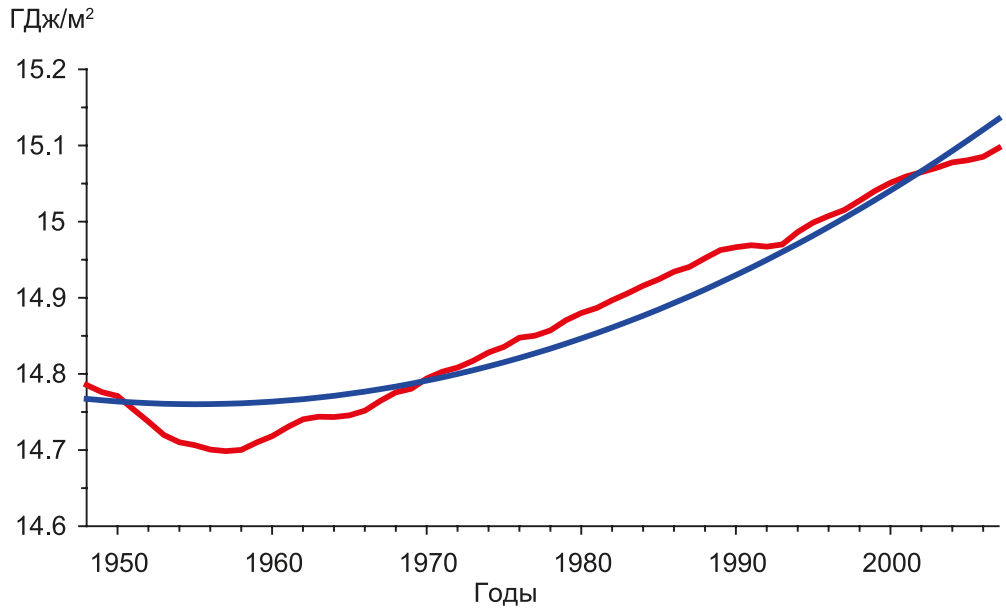

Рис. 4. Эволюция теплосодержания МО и её квадратичный тренд в период 1948–2007 гг. в слое 1000–5500 м

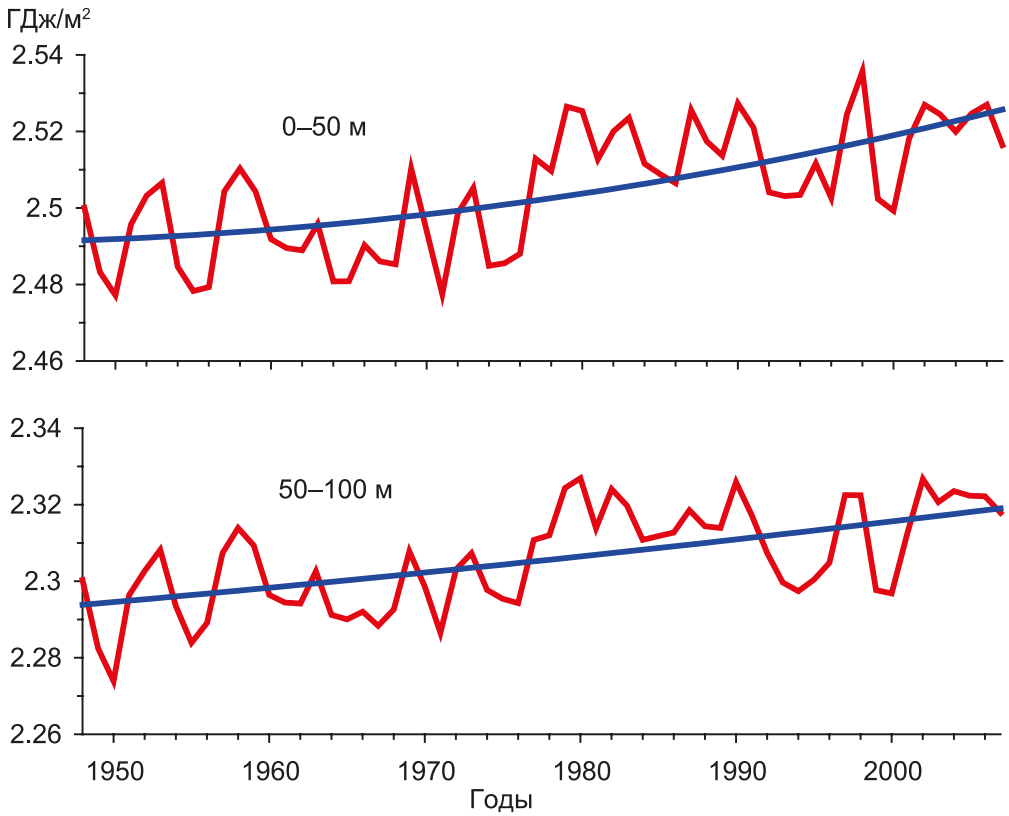

Рис. 5. Эволюция теплосодержания в верхнем квазиоднородном слое МО и её квадратичный тренд за период 1948–2007 гг.: 0–50 м, 50–100 м

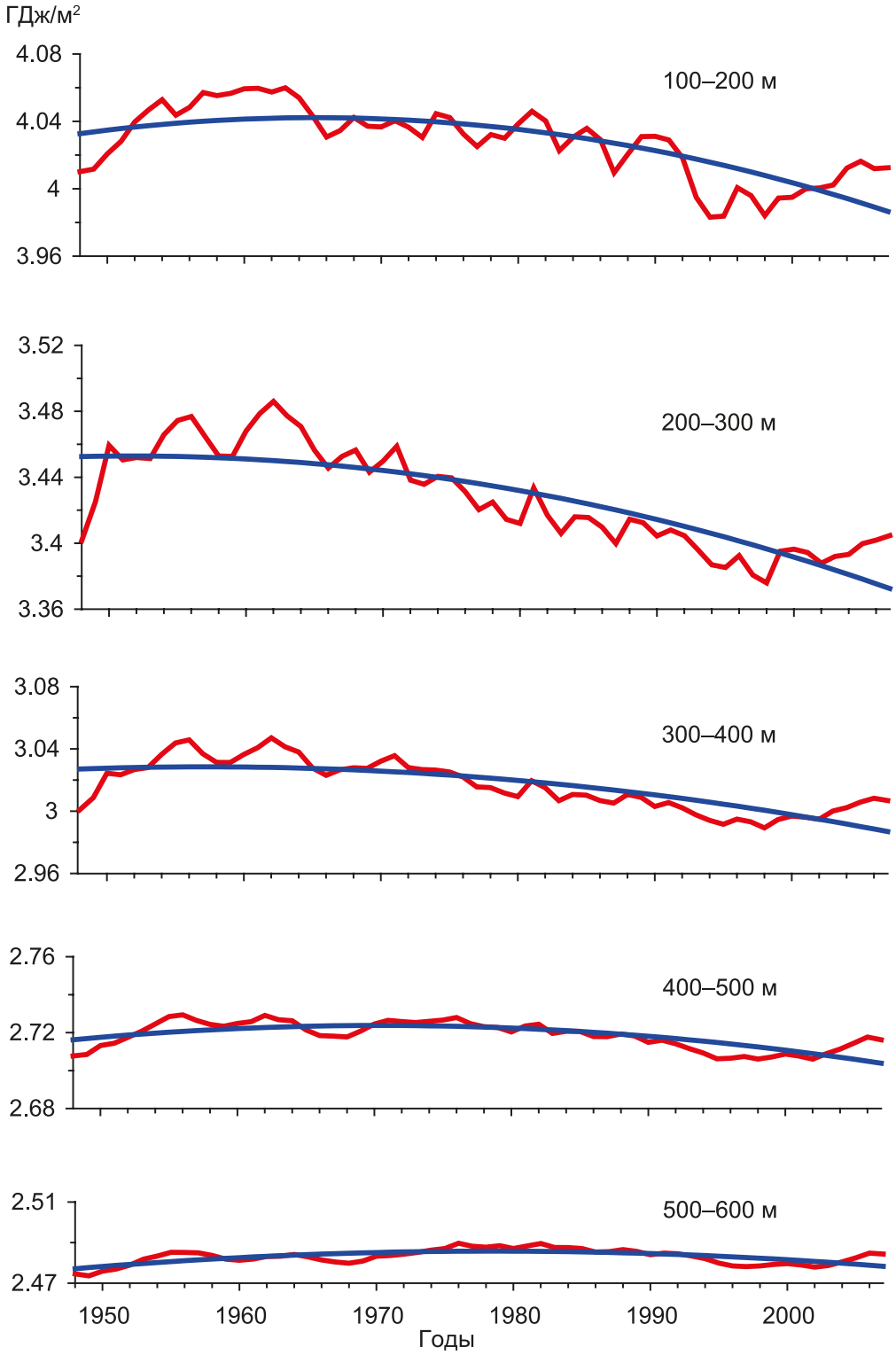

Рис. 6. Эволюция теплосодержания в слое главного термоклина МО
и её квадратичный тренд в период 1948–2007 гг.:
100–200 м, 200–300 м, 300–400 м, 400–500 м, 500–600 м

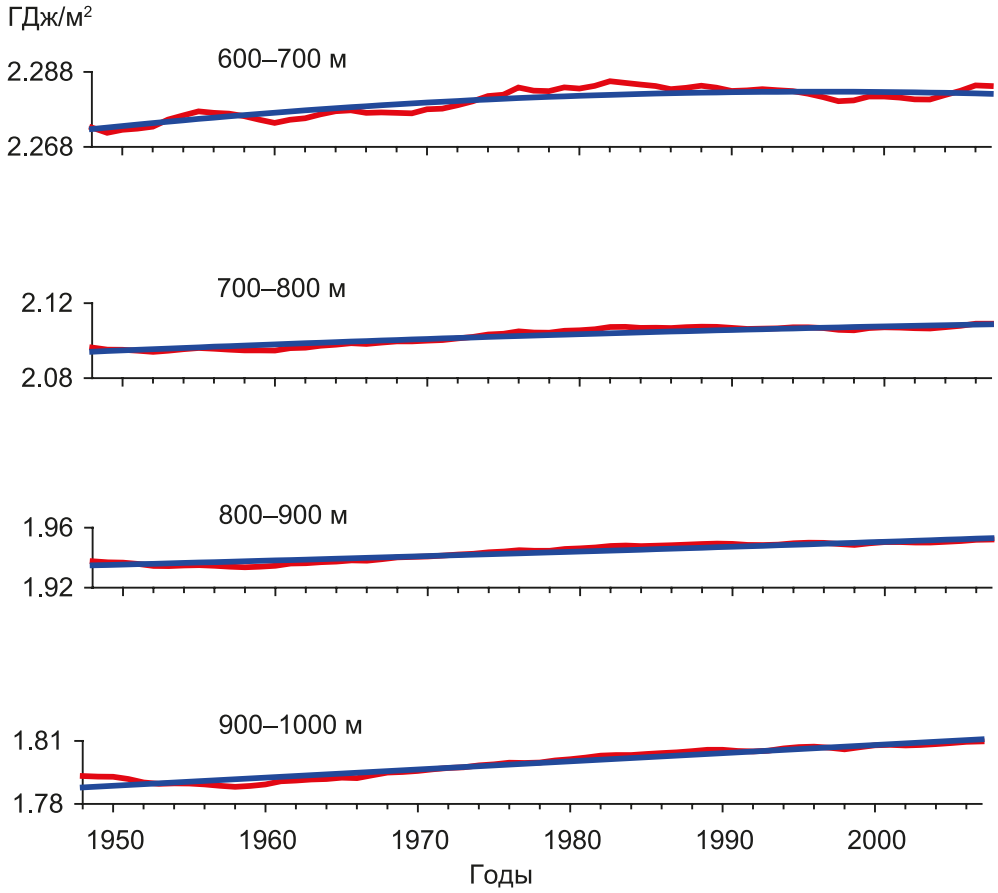

Рис. 7. Эволюция теплосодержания в глубинной части верхнего деятельного слоя МО и её квадратичный тренд за период 1948–2007 гг.: 600–700 м, 700–800 м, 800–900 м, 900–1000 м

В слое главного термоклина (рис. 8, горизонты 200, 250, 300 и 400 м) выше обозначенные районы выхолаживания ВДС значительно возросли по площади, достигнув экстремального развития в центрах северного и южного антициклонических круговоротов Тихого океана. Выхолаживание вод на этих промежуточных горизонтах проявилось в каждом из секторов Южного океана. Очаги выхолаживания ВДС в МО, установленные в квазиоднородном слое и в слое главного термоклина, наблюдаются также и глубже: на горизонтах 600, 700, 800, 900 и 1000 м. Однако в слое 800–1000 м сигнал о выхолаживании ВДС в северных районах Атлантического и Тихого океанов заметно ослабевает, тогда как в Южном океане он сохраняется и на горизонтах 1100 и 1200 м.

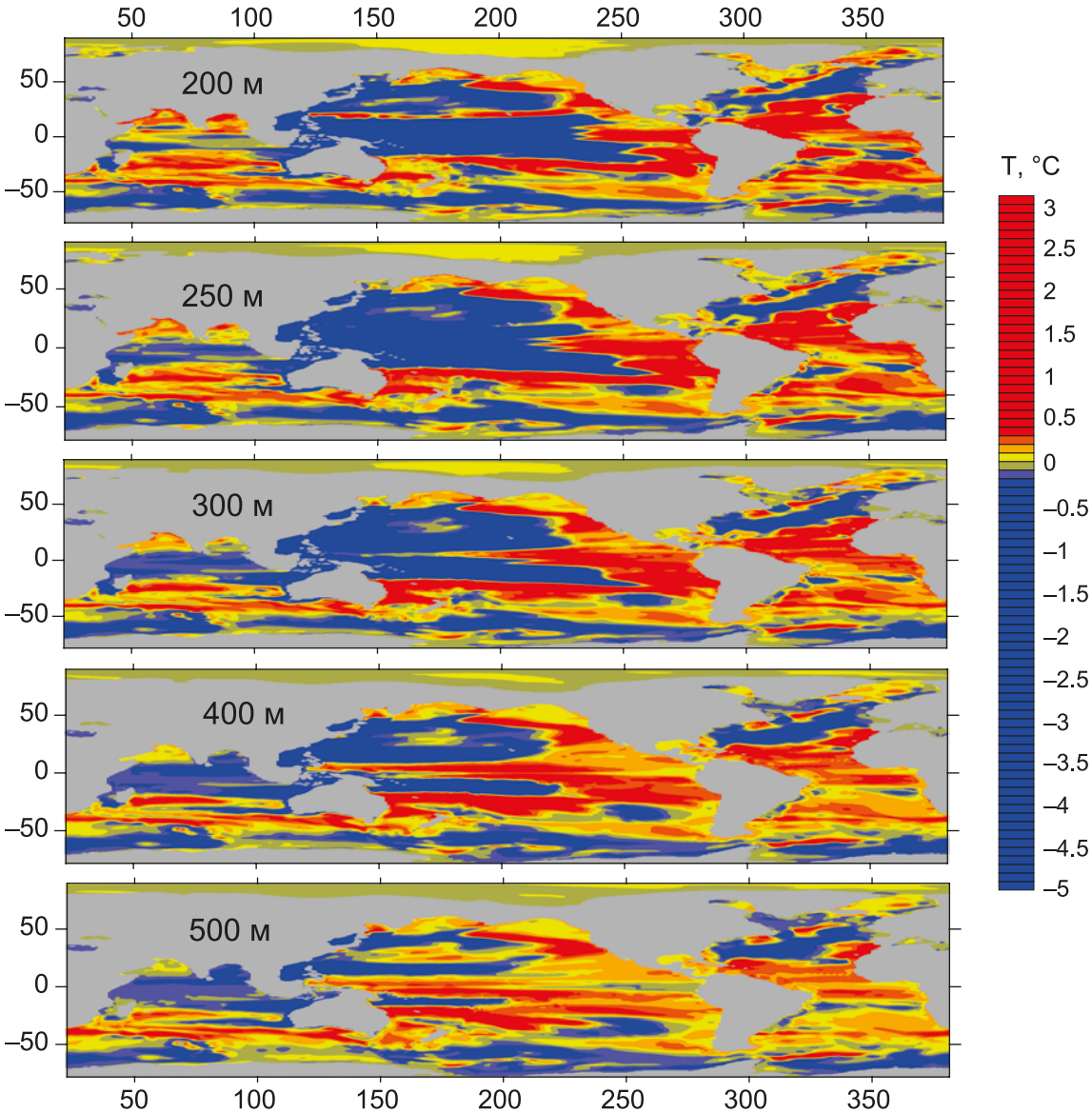

Рис. 8. Аномалии температуры воды МО (°С), соответствующие ядру МОСТОК

Обсуждение

Характер эволюции теплосодержания вод МО (рис. 2) позволяет рассматривать ее структуру в качестве суперпозиции двух режимов изменчивости: тренда и волновых колебаний. Тренд характеризует глубинный слой МО (рис. 4) и представляет собой вековые или более продолжительные изменения, а мультидекадные волновые колебания свойственны ВДС (рис. 3) океана.

Рост теплосодержания в глубинном слое (мощность источника 0.25 Вт/м^2) связывают с антропогенным фактором (Levitus et al., 2009), однако определенную роль могут играть естественные процессы, среди которых, например, такие, как уменьшение интенсивности апвеллингов вдоль западных побережий

континентов, сокращение генерации донных антарктических вод, а также ослабление циркуляции глобального океанического конвейера (Анисимов и др., 2002).

На основе фактического материала положительный тренд в глубинном слое (1000–3000 м) МО был выявлен (Levitus et al., 2009). Небезынтересно отметить, что согласно наблюдениям в эксперименте Атлантэкс-90 (Бышев и др., 1993), который проводился в фазу тепловой разгрузки МО (1975–1999 гг.), в Северной Атлантике, выступающей в качестве одного из климатических мультидекадных источников тепла, в ВДС (0–1000 м) были выявлены отрицательные аномалии теплосодержания, а глубже (1000–2000 м), очевидно неслучайно, – положительные.

В ВДС и глубинном слое МО эволюция теплосодержания принципиально различаются. В ВДС имеют место мультидекадные осцилляции теплосодержания с его эпизодическими повышениями (в 50–60-е годы) и сокращениями (в 80–90-е годы), поддерживая тем самым условно некоторый критический уровень параметра.

Мультидекадная изменчивость теплосодержания ВДС МО, несомненно, отражает важную роль последнего в формировании структуры возмущений современного климата. Ранее (Byshev et al., 2017; Бышев и др., 2016) были выявлены мультидекадные ритмы МО и их квазисинхронная связь на соответствующих временных масштабах с изменчивостью планетарной атмосферы (Бышев и др., 2011). Это позволяет обосновать существование процессов глобального внутрисистемного (океан–атмосфера–континент) мультидекадного перераспределения тепла, источником которого выступает теплосодержание ВДС МО.

Термодинамический режим мультидекадного ритма современного глобального климата, например, (1940–1999 гг.), целесообразно рассмотреть более детально. При этом важно разобрать и понять поведение глобальной атмосферы и МО в течение конкретного временного интервала. Накануне принятого в рассмотрение климатического ритма, т.е. в конце 30-х – начале 40-х годов в Северном полушарии сформировались аномальные температурные контрасты в приповерхностном слое атмосферы над океанами (Атлантическим и Тихим) и евроазиатским континентом (рис. 7 из (Бышев, Нейман, Романов, 2006)): поверхности океанов оказались аномально прогретыми, а поверхность центральных районов континента – аномально холодной. Подобное состояние региональной климатической системы наблюдалось при доминировании арктических вторжений воздушных масс на евроазиатский и северо-американский континенты и сопровождалось ослаблением зональной западной циркуляции атмосферы и сокращением теплового воздействия океанов на евроазиатский (Бышев и др., 2011) и североамериканский (Bond et al., 2003) континенты.

Было установлено, что в периоды развития над океанами меридиональных южных процессов атмосферной циркуляции, над материками развиваются меридиональные северные процессы и, напротив, в периоды учащения над океанами северных процессов – над материками наблюдаются учащения южных процессов.

Анализ амплитудно-фазовых диаграмм балансов смены южных и северных процессов атмосферной циркуляции над океанами и континентами (Бышев и др., 2004) указывает на мультидекадную их ритмичность.

Выходы в 1975–1999 гг. холодных арктических воздушных масс на теплые воды, распространяющиеся в высокие широты Атлантики (Северо-Атлантическим течением) и Тихого океана (Северо-Тихоокеанским течением), являются причиной экстремальных потоков тепла и влаги в атмосферу, развития аномальной облачности над районами интенсивного теплообмена (Бышев, Снопков, 1990; Бышев, 2003, рис. 104) и, как следствие, сокращения поступления коротковолновой солнечной радиации к поверхности океана. Выхолаживание и осолонение поверхностных вод на мультидекадном временном масштабе (25–35 лет) сопровождается развитием глубокой конвекции до 1000 м и более в Атлантическом (Бышев, Орлов, 1993) и до 400–500 м в Тихом (Бышев, Фигуркин, Анисимов, 2016) океанах, что предопределяет мощность ВДС в МО.

Одной из загадок МОСТОК следует признать наличие внутрислойных экстремальных возмущений полей скорости (рис. 9) и температуры в МО (рис. 8), тепло из которого очевидно перераспределяется к поверхности океана для последующего перехода в атмосферу и в нижележащий слой, создавая в нем условия его роста.

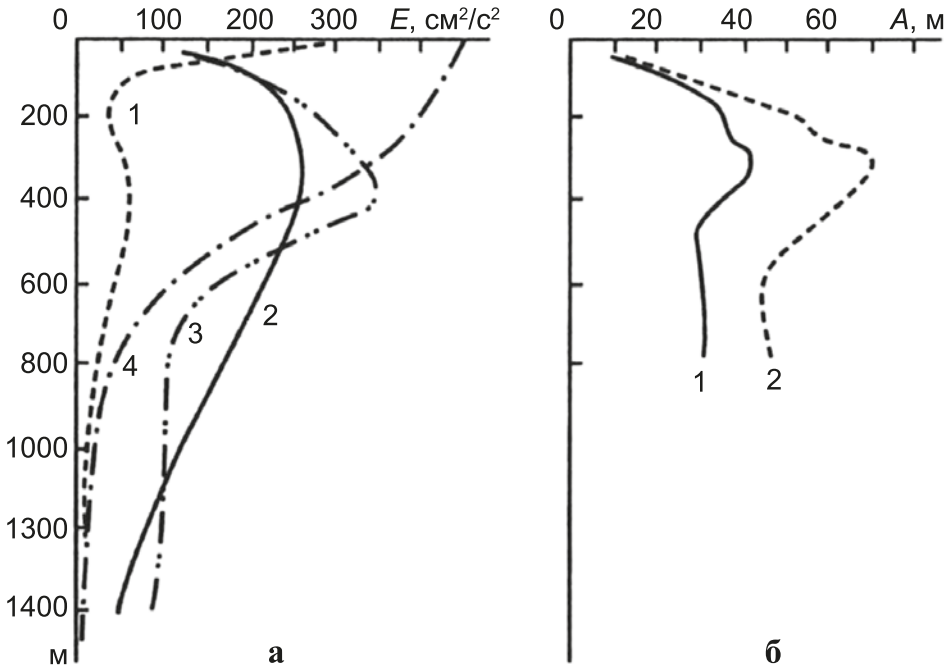

Рис. 9. Распределение с глубиной кинетической энергии синоптических возмущений (**а**) и амплитуды вертикальных колебаний изотермических поверхностей (**б**) в экспедициях:
а) 1 – Полигон-70; 2 – ПОЛИМОДЕ (VII – IX.1977 г.);
3 – ПОЛИМОДЕ (VII.1977 г. – IX.1978 г.); 4 – типичный ринг;
б) 1 – Полигон-70; 2 – ПОЛИМОДЕ (VII.1977 г. – IX.1978 г.).

В качестве основного механизма в периоды климатических фаз тепловой разгрузки ВДС МО следует рассматривать глубокую конвекцию в холодные сезоны Северного (декабрь–март) и Южного (август–сентябрь) полушарий. Экспериментальные данные гидрофизических исследований (Атлантэкс-90 и МЕГАПОЛИГОН (1987)), а также диагностические расчеты, качественно и количественно дополняют результаты численного моделирования. Гидрофизические эксперименты 70–80-х годов (Полигон-70, ПОЛИМОДЕ и др.), кроме того, позволили обнаружить и изучить структуру и динамику синоптических вихревых возмущений открытого океана, особенностью которых является наличие максимума кинетической энергии в слое главного термоклина (рис. 9а) и предопределяет экстремальные вертикальные флуктуации именно в этом слое (рис. 9б) (Бышев, 2003).

Можно полагать, что в климатическую фазу тепловой разгрузки МО синоптическая вихревая изменчивость значительно интенсифицируется, что позволяет рассматривать ее в качестве еще одного из вероятных механизмов, регулирующих вертикальный теплообмен в слое главного термоклина, выявленного в результате численного моделирования.

Заключение

Результаты численного воспроизведения циркуляции МО и ее климатической изменчивости в период с 1948 по 2007 гг. по модели ИВМ РАН, сопоставленные с диагностическими расчетами и натурными данными крупных гидрофизических экспериментов, проведенных в 70–80-е годы (Поолигон-70, МЕГАПОЛИГОН, Атлантэкс-90 и др.), позволили получить представление о планетарной мультидекадной осцилляции теплосодержания океана (МОСТОК). Квазисинхронная связь вариаций глобального климата с мультидекадными возмущениями теплосодержания МО послужили основанием более детально рассмотреть роль океанического фактора в изменчивости современного климата. Значимость подобных поисковых исследований обусловлена кажущейся «внезапностью» и высокой скоростью качественных изменений текущего климата (например, в середине 70-х годов), что послужило основанием назвать это явление климатическим «сдвигом». Как оказалось, сдвиги климата произошли также в конце 30-х годов (Agee, 1991) и на рубеже XX–XXI столетий и, вероятно, очередной будет возможен уже в ближайшее десятилетие.

Характерной особенностью МОСТОК является ее расположение в слое главного термоклина (100–600 м). В квазиоднородном слое (выше 0–100 м), и в глубинном слое (глубже 600–5500 м) термодинамический режим отличается от режима в слое главного термоклина. Возможно, именно это обстоятельство не позволило ранее обратить внимание на подобную важную деталь в структуре термодинамической изменчивости МО. Наличие экстремальных мультидекадных возмущений поля температуры на промежуточных уровнях (200, 300, 400, 500, 600 м) следует

отметить в качестве еще одной примечательной особенности осцилляции. Крупномасштабные гидрофизические эксперименты (Полигон-70, ПОЛИМОДЕ и др.) позволили выявить вихревую структуру и обнаружить, что вихри открытого океана обладают максимумами кинетической энергии именно в слое главного термоклина. Это позволяет допустить связь между синоптической вихревой активностью и МОСТОК. Однако последнее еще предстоит изучить.

Более высокая, чем в атмосфере, инерционность процессов позволяет осуществить в океане мониторинг изменчивости его термодинамического состояния. Интенсификация потоков явного и скрытого тепла из океана в атмосферу характеризует фазу тепловой разгрузки океана, т.е. его активного состояния. Климат на континентах при этом становится более влажным. В противоположную фазу, когда потоки тепла из океана заметно ослабевают, а из атмосферы, напротив, возрастают, климат становится более континентальным. Вместе с тем и в океане, и в атмосфере существуют процессы, которые способны демонстрировать сравнительно быстрые фазовые изменения. В океане к таким процессам относится глубокая конвекция, а в атмосфере – меридиональная циркуляция: глубокая конвекция приводит к изменению теплообмена между океаном и атмосферой, а меридиональная циркуляция влияет на выходы холодных с дефицитом влаги воздушных масс из высоких широт либо на теплые океанические воды, либо на континенты. Обнаруженные планетарные структуры в океане – МОСТОК и в атмосфере – ГАО, включая и выключая выше указанные процессы, способны обеспечивать и ускорять фазовые переходы климата.

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за ценные замечания, учет которых способствовал улучшению текста статьи. Работа выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, тема № 0128-2021-0003.

Литература

Атлантический гидрофизический Полигон-70 / Отв. ред. В.Г. Корт и В.С. Самойленко. М.: Наука, 1974. 317 с.

Атлас ПОЛИМОДЕ / Под редакцией А.Д. Вуриса, В.М. Каменковича, А.С. Монина. Published by the Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts, U.S.A. 1986. 370 с.

Бышев В.И. Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы / Отв. ред. Ю.А. Иванов. М.: Наука, 2003. 343 с.

Бышев В.И., Анисимов М.В., Гусев А.В., Грузинов В.М., Сидорова А.Н. О мультидекадной осцилляции теплосодержания Мирового океана // Океанологические исследования. 2020. Т. 48. № 3. С. 76–95. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).5.

Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. Климатические ритмы теплового режима Мирового океана // Природа. 2016. № 8. С. 26–33.

Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. О разнонаправленности изменений глобального климата на материках и океанах // ДАН. 2005. Т. 400. № 1. С. 98–104.

Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. О существенных различиях крупномасштабных изменений приземной температуры над океанами и материками // Океанология. 2006. Т. 46. № 2. С. 165–177.

Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. Глобальные атмосферные осцилляции в динамике современного климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 62–71.

Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. О фазовой изменчивости некоторых характеристик современного климата в регионе Северной Атлантики // ДАН. 2011. Т. 438. № 6. С. 817–822.

Бышев В.И., Орлов В.С. О природе внутритермоклинной линзы на субполярном фронте в Северной Атлантике // Океанология. 1993. Т. 33. № 3. С. 340–346.

Бышев В.И., Снопков В.Г. О формировании поля температуры воды поверхности океана в энергоактивной зоне северо-западной части Тихого океана на примере полигона «МЕГАПОЛИГОН» // Метеорология и гидрология. 1990. № 11. С. 70–77.

Бышев В.И., Усыченко И.Г. Тепловое состояние вод в дельте Гольфстрима в мае–июне 1990 г. // ДАН. 1995. Т. 341. № 4. С. 542–544.

Бышев В.И., Фигуркин А.Л., Анисимов И.М. Междекадная изменчивость термической структуры вод верхнего деятельного слоя на северо-западе Тихого океана // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 2. С. 240–244.

Бышев В.И., Фигуркин А.Л., Анисимов И.М. Современные климатические изменения термохалинной структуры вод СЗТО и флуктуации рыбных сообществ // Изв. ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 215–227.

Гидрофизические исследования по программе МЕЗОПОЛИГОН / Отв. ред. В.Г. Корт. М.: Наука, 1988. 263 с.

Пономарев В.И., Дмитриева Е.В., Шкорба С.П., Карнаухов А.А. Изменение планетарного климатического режима на рубеже XX–XXI веков // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21. № 1. С. 160–169. https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-160-169.

Романов Ю.А., Нейман В.Г., Бышев В.И., Серых И.В., Сонечкин Д.М., Гусев А.В., Кононова Н.К., Пономарев В.И., Сидорова А.Н., Фигуркин А. Л., Анисимов М.В. Общая оценка статистической значимости и климатической роли глобальных атмосферных и океанических осцилляций // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 2. С. 76–99. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).6.

Серых И.В, Сонечкин Д.М., Бышев В.И.,. Нейман В.Г., Романов Ю.А. Глобальная атмосферная осцилляция в тропосфере и нижней стратосфере // Системы контроля окружающей среды. 2018. № 13 (33). С. 70–78.

Серых И.В. Сравнение структуры и динамики Глобальной атмосферной осцилляции по данным наблюдений, ре-анализам и моделям CMIPS // В сборнике: CITES 2017. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. 2017. С. 97–101.

Эксперимент МЕГАПОЛИГОН. Гидрофизические исследования в северо-западной части Тихого океана / Отв. ред. Ю.А. Иванов. М.: Наука, 1992. 414 с.

Agee M. Trends in Cyclone and Anticyclone Frequency and Comparison with Periods of Warming and Cooling over the Northern Hemisphere // J. Climate. 1991. Vol. 4. P. 263–267.

Bond N.A., Overland J.E., Spillane M., Stabeno P. Recent shifts in the state of the North Pacific // Geophysical Research. Letters. 2003. Vol. 30(23). 2183. https://doi.org/10.1029/2003GL018597.

Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content // Pure and Applied Geophysics. 2017. Vol. 174. No. 7. P. 2863–2878. https://doi.org/10.1007/s00024-017-1557-3.

IPCC. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of WG1 to the IV Assessment Report of the IPCC / Eds. Solomon S. et al. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. 996 p.

IPCC. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. In: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovermental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

Lee T. and McPhaden M.J. Decadal phase change in large-scale sea level and winds in the Indo-Pacific region at the end of the 20-th Century // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35. L01605. https://doi.org/10.1029/2007 GL032419j.

Lyman J.M., Good S.A., Gouretski V.V., Ishii M., Johnson G.C., Palmer M.D., Smith D.M., Willis J.K. Robust warming of the global upper ocean // Nature. Vol. 465(7296):334-7, 20 May 2010, https://doi.org/10.1038/nature09043.

McCabe G.J., Clark M.P., Serezze M.C. Trends in Northern Hemisphere Surface Cyclone Frequency and Intensity // J. Climate. 2001. Vol. 14. P. 2763–2768.

Neiman V.G., Byshev V.I., Romanov Yu.A., Serykh I.V. The global atmosphere oscillations in the context of the recent climate change. In book: The Ocean in Motion. Circulation, Waves, Polar Oceanography. Ser. «Springer Oceanography» Amsterdam, 2018. P. 349–360. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_22.

Ponomarev V.I., Kaplunenko D.D., Ishida H. Centennial and semisentennial Climatic Tendencies in the Asian continental and Pacific marginal areas // Bulletin of Japan Sea Research Institute. 2001. No. 32. P. 7790.

Serykh I.V., Sonechkin D.M. Interrelations Between Temperature Variations in Oceanic Depths and the Global Atmospheric Oscillation // Pure and Applied Geophysics. 2020. Vol. 177. No. 12. P. 5951–5967. https://doi.org/10.1007/s00024-020-02615-9.

Serykh I.V., Sonechkin D.M., Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Y.A. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections // Pure and Applied Geophysics. 2019. Vol. 176. No. 8. P. 3737–3755. https://doi.org/10.1007/s00024-019-02182-8.

Yamasaki S., Nanawa K. Regimes shift found in the Northern Hemisphere SST field // Met. Soc. Japan. 2002. Vol. 80. No. 1. P. 119–135.

ON THE PECULIARITIES OF THE STRUCTURE OF THE MULTIDECADE OSCILLATION OF THE WORLD OCEAN

Byshev V.I.[1], Anisimov M.V.[1], Gusev A.V.[1,2], Sidorova A.N.[1]

[1]*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science,*
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: labbyshev@ocean.ru
[2]*Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Science,*
8, ul. Gubkina, Moscow, 119333, Russia,
e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com
Submitted 06.09.2021, accepted 29.11.2021.

One of the most remarkable peculiarities of the modern climate, undoubtedly, should be recognized as the climatic shift observed in the mid-70s of the last century. The reasons for this phenomenon for a long time, despite the activation of climatologists from all over the world, remained a mystery that requires its disclosure. First of all, this was due to the fact that the shift that took place turned out to be unexpected for scientists and was accompanied by rapid qualitative changes in the planetary climate. To date, thanks to the efforts of scientists using the results of rapidly developing numerical modeling, diagnostic calculations and observational data in large hydrophysical experiments in various regions of the World Ocean (WO), an understanding of the role of the ocean factor in the variability of the current climate has developed. It became clear that climatic shifts are an important feature of the internal dynamics of the climate system. The most obvious evidence of intrasystemic processes should be considered the discovered planetary structures in the atmosphere – Global Atmospheric Oscillation (GAO) and in the ocean – Multi-decadal Oscillation of the Heat content in the Ocean (MOHO), which are quasi-synchronous accompanying variations in the modern climate. GAO, its structure and features have been discussed in detail earlier in a number of studies. As for the MOHO, its structure and features are discussed in the proposed work. It is characteristic that the MOHO is located in the layer of the main thermocline (100–600 m). In a quasi-uniform layer (0–100 m), and in a deep layer (600–5500 m), the thermodynamic regime differs from the regime in the layer of the main thermocline. Probably, it is precisely this circumstance that did not allow earlier to draw attention to such an important detail in the structure of the WO thermodynamic variability. The presence of extreme multi-decadal temperature field disturbances at intermediate levels (200, 300, 400, 500, 600 m) should be noted as an important characteristic feature of the oscillation. Large-scale hydrophysical experiments (POLYGON-70, POLYMODE, etc.) made it possible to reveal the vortex structure in the dynamics of WO waters and to discover that the vortices of the open ocean have maxima of kinetic energy precisely in the layer of the main thermocline. This allows us to assume a connection between synoptic eddy activity and MOHO. However, the latter remains to be studied.

Keywords: World ocean (WO), ocean heat content oscillation, main thermocline, phase variability, climate system, modern climate, numerical modeling

Acknowledgement: The authors thank reviewers for valuable comments, the accounting of which contributed to the improvement of the text of the article. The work was funded by Federal assignment to Shirshov Institute of Oceanology RAS No. 0128-2021-0003.

References

Agee, M., 1991: Trends in Cyclone and Anticyclone Frequency and Comparison with Periods of Warming and Cooling over the Northern Hemisphere. *J. Climate*, **4**, 263–267.

Atlanticheskiy gidrofizicheskiy POLIGON-70 (Atlantic Hydrophysical POLYGON-70). 1974. Otv. red. V.G. Kort and V.S. Samoylenko, Moscow, Nauka, 317 p.

Atlas POLIMODE. Eds. A.D. Vurisa, V.M. Kamenkovicha, A.S. Monina, 1986: Published by the Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts, U.S.A., 370 p.

Bond, N.A., J.E. Overland, M. Spillane, and P. Stabeno, 2003: Recent shifts in the state of the North Pacific. *Geophysical Research. Letters,* **30**(23), 2183, https://doi.org/10.1029/2003GL018597.

Byshev, V.I. and I.G. Usychenko, 1995: Teplovoe sostoyanie vod v del'te Gol'fstrima v mae-iyune 1990 g. (Thermal state of waters in the Gulf Stream delta in May-June 1990). *Doklady Earth Sciences*, **341** (4), 542–544.

Byshev, V.I. and V.G. Snopkov, 1990: On surface temperature field forming in energy-active zone of the North-West Pacific Ocean in context of the MEGAPOLYGON Project. *Meteorology and Hydrology,* **11**, 70–77.

Byshev, V.I. and V.S. Orlov, 1993: O prirode vnutritermoklinnoj linzy na subpoljarnom fronte v Severnoj Atlantike (On the nature of an intrathermocline lens at the sub-polar front in the Northern Atlantic ocean*). Okeanology,* **33**(3), 340–346, [In Russian].

Byshev, V.I., 2003: *Synoptical and Large-Scale Variability of Ocean and the Atmosphere*. Ed. by U.A. Ivanov. Moscow, Nauka, 343 p.

Byshev, V.I., A.L. Figurkin, and I.M. Anisimov, 2017: Interdecadal Variability in Thermal Structure of Water in the Upper Active Layer in the Northwestern Pacific Ocean. *Doklady Earth Sciences,* **477**, Part 1, 1343–1347.

Byshev, V.I., M.V. Anisimov, A.V. Gusev, V.M. Gruzinov, and A.N. Sidorova, 2020: On the multi-decadal oscillation of the heat content of the World ocean. *Journal of Oceanological Research*, **48**(3), 76–95, https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).5.

Byshev, V.I., V.G. Neiman and Yu.A. Romanov, 2016: Klimaticheskie ritmy teplovogo rezhima Mirovogo okeana (Climate rhythms of the thermal regime of the World Ocean). *Priroda,* **8**, 26–33.

Byshev, V.I., V.G. Neiman, and Yu.A. Romanov, 2005: Discrepancy of global climate change over continents and oceans. *Doklady Earth Sciences*, **400**(1), 77–83.

Byshev, V.I., V.G. Neiman, and Yu.A. Romanov, 2006: On the essential differences between the large-scale variations of the surface temperature over the oceans and continents. *Oceanology*, **46**(2), 147–158.

Byshev, V.I., V.G. Neiman, M.V. Anisimov, A.V. Gusev, and I.V. Serykh, A.N. Sidorova, A.L. Figurkin, and I.M. Anisimov, 2017: Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content. *Pure and Applied Geophysics,* **174**(7), 2863–2878, https://doi.org/10.1007/s00024-017-1557-3.

Byshev, V.I., V.G. Neiman, Yu.A. Romanov, and I.V. Serykh, 2011: Phase variability of some characteristics of the present-day climate in the Northern Atlantic region. *Doklady Earth Sciences,* **438**(2), 887–892, [In Russian].

Byshev, V.I., V.G. Neiman, Yu.A. Romanov, and I.V. Serykh, 2014: Global'nye atmosfernye oscilljacii v dinamike sovremennogo klimata (Global atmospheric oscillations in the dynamics of modern climate). *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa,* **11**(1), 62–71, [In Russian].

Byshev, V.I., A.L. Figurkin, and I.M. Anisimov, 2016: Sovremennye klimaticheskie izmenenija termohalinnoj struktury vod SZTO i fluktuacii rybnyh soobshhestv (Modern climate changes in the thermohaline structure of NWPO waters and fluctuations in fish communities). *Izv. TINRO*, **185**, 215–227.

Eksperiment MEGAPOLIGON. Gidrofizicheskie issledovaniya v severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana. (The MEGALOPOLIGON experiment. Hydrophysical research in the northwestern Pacific Ocean), 1992. Otv. red. Yu.A. Ivanov, Moscow, Nauka, 414 p.

Gidrofizicheskie issledovaniya po programme MEZOPOLIGON (Hydrophysical studies under the MESOPOLYGON program), 1988. Otv. red. V.G. Kort, Moscow, Nauka, 263 p.

IPCC. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. *Contribution of WG1 to the IV Assessment Report of the IPCC*. Eds. Solomon S. et al., 2007: Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 996 p.

IPCC. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovermental Panel on Climate Change.* Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., 2013: Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1535 p.

Lee, T. and M.J. McPhaden, 2008: Decadal phase change in large-scale sea level and winds in the Indo-Pacific region at the end of the 20-th Century. *Geophysical Research Letters,* **35**, L01605, https://doi.org/10.1029/2007 GL032419j.

Lyman, J.M., S.A. Good, V.V. Gouretski, M. Ishii, G.C. Johnson, M.D. Palmer, D.M. Smith, and J.K. Willis, 2010: Robust warming of the global upper ocean. *Nature,* 2010 May 20, **465**(7296):334-7, https://doi.org/10.1038/nature09043. PMID: 20485432.

McCabe, G.J., M.P. Clark, and M.C. Serezze, 2001: Trends in Northern Hemisphere Surface Cyclone Frequency and Intensity. *J. Climate*, **14,** 2763–2768.

Neiman, V.G., V.I. Byshev, Yu.A. Romanov, and I.V. Serykh, 2018: The global atmosphere oscillations in the context of the recent climate change. In book: *The Ocean in Motion. Circulation, Waves, Polar Oceanography.* Ser. «Springer Oceanography», Amsterdam, 349–360, https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_22.

Ponomarev, V.I., D.D. Kaplunenko, H. Ishida, 2001: Centennial and semisentennial Climatic Tendencies in the Asian continental and Pacific marginal areas. *Bulletin of Japan Sea Research Institute,* **32**, 7790.

Ponomarev, V.I., E.V. Dmitrieva, S.P. Shkorba, and A.A. Karnaukhov, 2018: Izmenenie planetarnogo klimaticheskogo rezhima na rubezhe XX–XXI vekov (Changes in the planetary climate regime at the turn of the XX-XXI centuries). *Vestnik MGTU*, **21**(1), 160–169, https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-160-169.

Romanov, Yu.A., V.G. Neiman, V.I. Byshev, I.V. Serykh, D.M. Sonechkin, A.V. Gusev, N.K. Kononova, V.I. Ponomarev, A.N. Sidorova, A.L. Figurkin, and M.V. Anisimov, 2019: Overall assessment of the statistical value and climate role of global atmospheric and oceanic oscillations. *Journal of Oceanological Research,* **47**(2), 76–99, https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).6.

Serykh, I.V. and D.M. Sonechkin, 2020: Interrelations Between Temperature Variations in Oceanic Depths and the Global Atmospheric Oscillation. *Pure and Applied Geophysics*, **177**(12), 5951–5967, https://doi.org/10.1007/s00024-020-02615-9.

Serykh, I.V., D.M. Sonechkin, V.I. Byshev, V.G. Neiman, and Y.A. Romanov, 2019: Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections. *Pure and Applied Geophysics*, **176**(8), 3737–3755, https://doi.org/10.1007/s00024-019-02182-8.

Serykh, I.V, D.M. Sonechkin., V.I. Byshev, V.G. Neyman, and Yu.A. Romanov, 2018: Global'naya atmosfernaya ostsillyatsiya v troposfere i nizhney stratosfere (Global Atmospheric Oscillation in troposphere and lower stratosphere). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy (Environmental control systems),* **13** (33), 70–78.

Serykh, I.V., 2017: Sravnenie struktury i dinamiki Global'noy atmosfernoy ostsillyatsii po dannym nablyudeniy, re-analizam i modelyam CMIPS (Dynamics and spatial structure of Global atmospheric oscillation based on observations, re-analyses and CMIP5 models) // *CITES 2017. Mezhdunarodnaya molodezhnaya shkola i konferentsiya po vychislitel'no-informatsionnym tekhnologiyam dlya nauk ob okruzhayushchey srede (International Young Scientists School and Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences),* 97–101.

Yamasaki, S. and K. Nanawa, 2002: Regimes shift found in the Northern Hemisphere SST field. *Met. Soc. Japan,* **80**(1), 119–135.