© Бышев В.И., Анисимов М.В., Гусев А.В., Грузинов В.М., Сидорова А.Н., 2020, Океанологические исследования, 2020, Том 48, № 3, С. 76–95

УДК 551.465 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).5

О МУЛЬТИДЕКАДНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА

Бышев В.И.[1], Анисимов М.В.[1], Гусев А.В.[1,2], Грузинов В.М.[3], Сидорова А.Н.[1]

[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36, e-mail: labbyshev@ocean.ru,
[2]Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 8, e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.ru,
[3]Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Россия, 119034, Москва, Кропоткинский пер., 6, e-mail: polarf@meteo.ru
Статья поступила в редакцию 30.07.2020, одобрена к печати 23.10.2020.

Мультидекадная (мультидесятилетняя) ритмичность – это одна из наиболее важных особенностей динамики современного климата. Ритм 1940–1999 гг. представлял собой двухфазовую структуру, в которой начальная фаза (1940–1974 гг.) была существенно континентальной, а заключительная (1975–1999 гг.) – относительно влажной. Переход климата из континентальной фазы во влажную в середине 70-х годов XX столетия оказался «внезапным» и был признан климатическим сдвигом. Определенная глобальность и квазисинхронность мультидекадных изменений климата реализуется при участии планетарных термодинамических структур и в океане, и в атмосфере – двух важнейших компонентах климатической системы. Наличие Глобальной атмосферной осцилляции было открыто и детально исследовано. В настоящей работе предлагается первая попытка рассмотреть содержание и особенности планетарной мультидекадной осцилляции теплосодержания Мирового океана. Анализ океанической осцилляции основан на результатах численного моделирования циркуляции вод Мирового океана в период с 1948 по 2007 гг. по модели Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН. Разности средних полей температуры воды в верхнем 1200-метровом слое, рассчитанные для двух противоположных фаз осцилляции, позволили выявить главные особенности ее структуры.

Ключевые слова: Мировой океан, атмосфера, современный климат, температура, верхний деятельный слой, глубокая конвекция, циркуляция

Введение

Наблюдаемая фазовая мультидекадная (мультидесятилетняя) изменчивость крупномасштабного теплообмена между океанами и континентами, признаки которого в Северном полушарии в явном виде были установлены в (Бышев и др., 2001; Бышев и др., 2005, 2006), является одной из важнейших особенностей внутренней динамики современной климатической системы Земли. В фазы ослабления теплообмена океана с атмосферой верхний деятельный слой (ВДС) океана аккумулирует тепло, а в фазы усиления теплообмена происходит его тепловая разгрузка: тепло-

содержание ВДС сокращается (Бышев, Снопков, 1990; Бышев и др., 2016; Byshev et al., 2017). Обнаружена определенная ритмичность современного климата (Бышев и др., 2011; Бышев и др., 2016) с чередованием его относительно влажных фаз, например (1905–1935) и (1975–1999), и существенно континентальных фаз, например (1940–1974) и (2000–2018), которые соответствуют периодам тепловой разгрузки и теплонакопления ВДС Мирового океана (Byshev et al., 2017; Бышев и др., 2017; Бышев и др., 2018; Романов и др., 2019; Дианский, Багатинский, 2019).

Небезынтересно отметить, что климатические сдвиги в Северном полушарии наблюдались в частоте и интенсивности циклонической активности и в приповерхностной температуре в конце 30-х–начале 40-х (Agee, 1991) и в середине 70-х годов (McCabe et al., 2001). Признаки наличия глобальных осцилляций в системе океан–атмосфера–континенты следуют из результатов ряда исследований, демонстрирующих квазисинхронные мультидекадные фазовые возмущения в Тихом и Индийском океанах уровня и завихренности поля ветра (Lee, McPhaden, 2008), климатических процессов в Охотском и Гренландском морях (Nakamura, 2013), температуры воды в поверхностном слое на северо-западе Атлантики и на востоке экваториальной части Тихого океана (Kim, An, 2013), тепловой разгрузки ВДС в информативных районах Атлантического, Тихого и Южного океанов (Byshev et al., 2017). Несомненно, что глобальные связи (De Viron et al., 2013) в системе океан–атмосфера–континент способны обеспечить такие планетарные структуры как Глобальная Атмосферная Осцилляция (ГАО) (Бышев и др., 2014) и **М**ультидекадная **ОС**цилляция **Т**еплосодержания ВДС **ОК**еана (МОСТОК) (Byshev et al., 2017), причем ГАО синхронизирует все известные региональные атмосферные осцилляции, а МОСТОК – океанические.

Отдельный ритм современного климата длится около 60 лет и, как уже отмечалось выше, состоит из двух качественно различающихся фаз: влажной – одной из них и континентальной – другой. Смена фаз климата возникает неожиданно и совершается в течение нескольких лет, что воспринимается как климатический сдвиг (Bond et al., 2003; Stephens et al., 2001; Tsonis, Swanson, 2007; Wang et al., 2009). Текущая фаза климата, переход к которой произошел на рубеже XXI-го столетия, является континентальной. Она определяется рядом характерных признаков, наиболее значительным из которых является сокращение влажности планетарной атмосферы (Mao et al., 2017), сопровождающееся увеличением пожароопасности и, как следствие, повсеместным распространением природных лесных пожаров (Hayasaka et al., 2019). Поскольку подготовка смен фаз климата занимает определенное время (25–35 лет), то возникает возможность сформулировать и решить задачу прогноза очередного климатического сдвига, а также изучить факторы, которые обеспечивают внезапность и необратимость наблюдаемого процесса.

Диагностические расчеты (Бышев и др., 2017), материалы численного моделирования (Гусев, Дианский, 2014) и экспериментальные данные (Бышев, 2003) позволили установить, что смена фаз климата представляет собой смену режима теплообмена океана и атмосферы в глобальном плане: океан последовательно из фазы

тепловой разгрузки переходит в фазу теплонакопления, а затем вновь к фазе тепловой разгрузки и т.д. Подобные фазовые переходы климатической системы, очевидно, совершались в 1935–1940 гг., в 1973–1977 гг., на рубеже XX–XXI-го столетий (Бышев и др., 2011), и, вероятно, очередной сдвиг может произойти уже в течение текущей декады (Бышев и др., 2017). Глобальные изменения, естественно, должны сопровождаться планетарными структурами как в океане, так и в атмосфере. В атмосфере таковой является ГАО (Бышев и др., 2014). Важные особенности ГАО и ее статистическая значимость были детально рассмотрены (Бышев и др., 2016; Serykh et al., 2019). В океане также были выявлены (Byshev et al., 2017) признаки наличия планетарной и квазисинхронной мультидекадной осцилляции (МОСТОК), структуру и особенности которой требуется раскрыть и осмыслить, что и предлагается сделать в настоящей статье. Кроме того, нами будут определены основные источники тепла мультидекадной осцилляции в Мировом океане: их местоположение и значимость.

Материалы и методы

В качестве основных материалов исследования структуры МОСТОК были приняты результаты численного моделирования циркуляции Мирового океана (Гусев, Дианский, 2014) по модели Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН (INMOM). Диагностические расчеты (Бышев и др., 2016; 2017) и натурные данные, полученные в экспериментах Полигон–70, ПОЛИМОДЕ, Мегаполигон и Атлантэкс–90 (Бышев, 2003), позволили укрепиться в реальности результатов численного моделирования. Приведем краткие сведения о модели INMOM (Дианский, 2013). Модель основывается на физически полных уравнениях океана в приближениях Буссинеска и гидростатики, записанных в обобщенной ортогональной системе координат по горизонтали и сигма-системе по вертикали (преобразование исходной задачи к задаче с плоским дном – изобатическая система координат). Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура, соленость и отклонение уровня океана от невозмущенного состояния. Использовано нелинейное уравнение состояния, учитывающее сжимаемость воды, специально предназначенное для моделей циркуляции океана (Brydon et al., 1999). Главная особенность INMOM, которая отличает ее от известных зарубежных и отечественных моделей, заключается в том, что при ее численной реализации используется метод расщепления по физическим процессам. На верхней границе используется условие свободной поверхности океана, что позволяет описывать длинные гравитационные волны, в т.ч. приливы, ветровые нагоны и т.д. Метод расщепления позволяет выделять независимую задачу баротропной циркуляции типа линейных уравнений «мелкой воды» на каждом временно́м шаге. Эти уравнения решаются с помощью оригинального неявного метода, что позволяет уйти от сильного ограничения на временной шаг в случае глубокого океана. Это особенно важно для проведения расчетов с высоким пространственным разрешением.

Результаты

Для анализа мультидекадной изменчивости теплосодержания ВДС Мирового океана были рассчитаны и построены поля возмущений температуры воды между фазами климата (1948–1974 гг.) и (1975–1999 гг.) для горизонтов: 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200 метров. Поскольку численное моделирование Мирового океана было проведено с высоким временным (1 час) и пространственным (0.5 градуса по широте х 1.0 градуса по долготе) разрешением, то в каждом узле расчетной сетки для указанных выше фаз климата были рассчитаны ансамбли из более, чем 200000 вертикальных профилей температуры, осреднения по которым позволяют получить статистически значимые оценки искомых параметров.

На приповерхностных горизонтах ВДС (рис. 1–3) выделяются районы, где в период с 1975 по 1999 гг. происходило выхолаживания вод Мирового океана. 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. На промежуточных горизонтах (рис. 4–9) уже названные районы выхолаживания ВДС значительно возросли по площади, достигнув экстремального развития в центрах северного и южного антициклонических круговоротов Тихого океана на горизонтах 200, 250 и 300 м. Выхолаживание вод проявилось хорошо также в каждом из секторов Южного океана. Очаги выхолаживания ВДС в Мировом океане, отмеченные выше на приповерхностных (рис. 1–3) и промежуточных (рис. 4–9) горизонтах, проявляются и на глубинных горизонтах: 600 и 700 м (рис. 10–11). На глубинах 800, 900 и 1000 м сигнал о выхолаживании ВДС в северных регионах Атлантического и Тихого океанов заметно ослабевает, однако в Южном океане он сохраняется и на горизонтах 1100 и 1200 м.

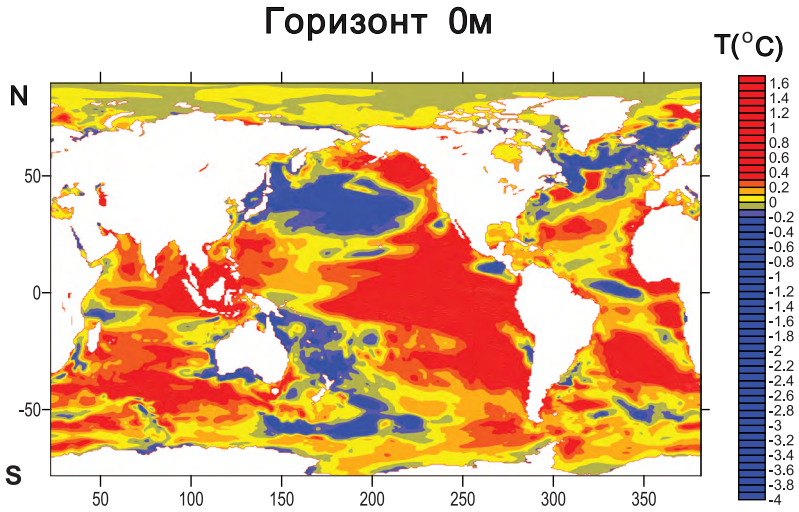

Рис. 1. Мультидекадные возмущения поля температуры (°С) Мирового океана на горизонте 0 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

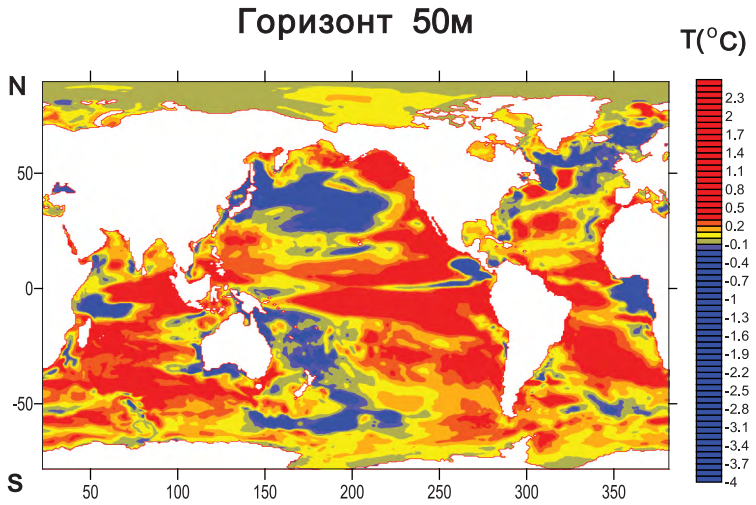

Рис. 2. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 50 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

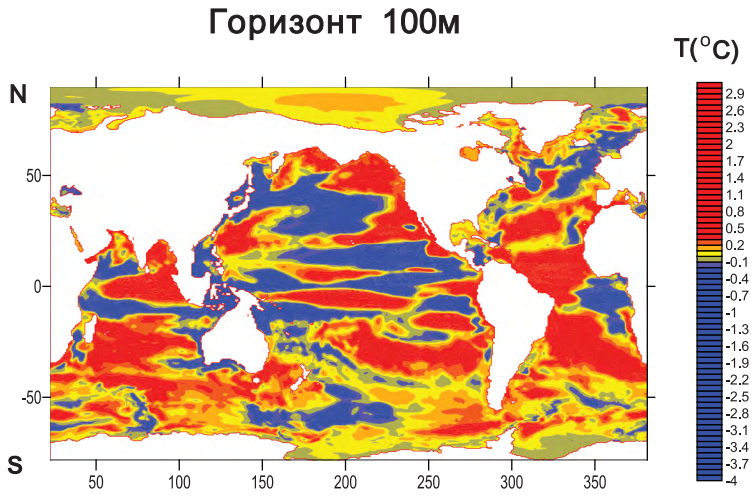

Рис. 3. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 100 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

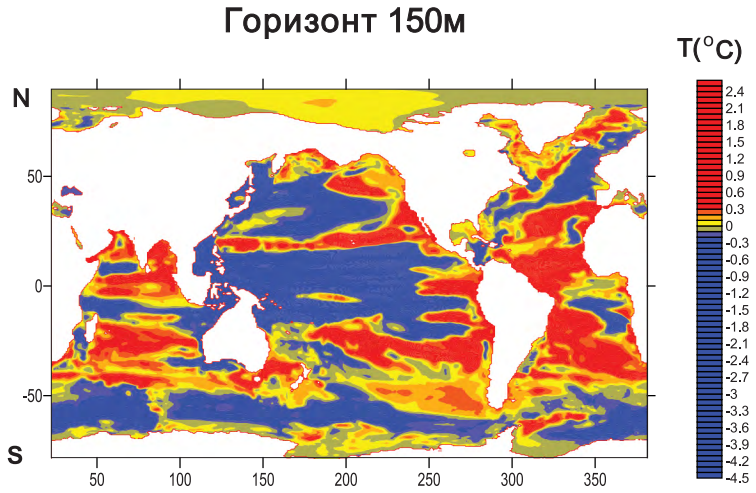

Рис. 4. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 150 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

Вместе с тем следует отметить, что в период с 1975 по 1999 гг. на значительной акватории Мирового океана ВДС характеризовался положительными изменениями теплосодержания, в частности это наблюдалось вдоль восточных границ Атлантического и Тихого океанов. МОСТОК, таким образом, представляет собой структуру с отрицательными и положительными изменениями теплосодержания ВДС Мирового океана. Очаги отрицательных изменений теплосодержания ВДС, естественно, являются в фазу климата (1975–1999 гг.) источниками океанического тепла, снабжающими атмосферу и способствующими интенсификации в ней циклогенеза. В качестве примера достаточно упомянуть Баренцево море, где теплый промежуточный слой атлантических вод является источником циклогенеза в атмосфере, формируя относительно теплый и мягкий климат в регионе. Эта проблема обсуждается также в работах (Бышев и др., 2016, 2017; Бышев, Снопков, 1990; Бышев, 2003). Положительные изменения теплосодержания ВДС, напротив, свидетельствуют о местоположении районов, в которых в указанный период наблюдается ослабление циклогенеза.

Обсуждение

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 Мирового океана в течение конкретного временного интервала. Накануне принятого в рассмотрение климатического ритма, т.е. в конце 30-х – начале 40-х гг., в Северном полушарии сформировались аномальные температурные контрасты в приповерхностном слое атмосферы над океанами (Атлантическим и Тихим) и евроазиатским континентом (рис. 7 из (Бышев и др., 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, а также 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. Диагноз амплитудно-фазовых диаграмм балансов смены южных и северных процессов атмосферной циркуляции над океанами и континентами (Бышев и др., 2002, 2004) указывает на их мультидекадную 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 и др., 2016) океанах, что предопределяет в Мировом океане мощность ВДС.

Значительное выхолаживание верхнего 1000-метрового слоя океана (результат многолетних интенсивных потоков явного и скрытого тепла с одновременным ослаблением облачностью притока к поверхности океана коротковолновой солнечной радиации) в определенный момент приводит к «внезапному» прерыванию глубокой конвекции, а вместе с ней и больших потоков тепла из океана в атмосферу, сокращению мощности облачного покрова, росту притока к поверхности океана коротковолновой солнечной радиации. Система океан–атмосфера в течение 2–3 лет меняет режим термодинамического взаимодействия и переходит из состояния тепловой разгрузки ВДС океана в состояние его теплонакопления. Это воспринимается как климатический сдвиг. Далее система находится в режиме восстановления ВДС своего начального теплосодержания.

Переходы климатической системы «внезапно» из влажной фазы в континентальную, а затем снова во влажную, сопровождаются либо ослаблением западного переноса влажных и теплых океанических воздушных масс на континенты, либо, напротив, его усилением, что оказывает существенное влияние на экономическую, социальную, да и политическую жизнь огромных территорий (засухи, наводнения, лесные пожары и пр.). Значительное выхолаживание верхнего 1000-метрового слоя океана приводит в определенный момент к быстрой перестройке атмосферной циркуляции в Северном полушарии: арктические вторжения на океаны сокращаются, а на континенты учащаются, а вместе с этим прерывается глубокая конвекция в океане, сокращаются потоки тепла из океана в атмосферу, наблюдается ослабление облачности и рост притока к поверхности океана коротковолновой солнечной радиации. Однако процессы восстановления теплосодержания ВДС океана после его тепловой разгрузки занимают значительное время (25–35 лет) и демонстрируют в океане фазовые изменения (Анисимов и др., 2012; Бышев и др., 2016), которые можно фиксировать, проводя эпизодически гидрологические наблюдения в информативных районах. Таким образом, прогноз климатических сдвигов современного климата может быть основан на мониторинге мультидекадного фазового состояния теплосодержания ВДС Мирового океана.

Мультидекадная осцилляция теплосодержания ВДС Мирового океана представляет собой квазисинхронные планетарные изменения в поле температуры воды, которые проявляются на приповерхностных (рис. 1–4), промежуточных (рис. 5–8) и глубинных (рис. 9–12) горизонтах. Наиболее важными ее элементами являются океанические источники тепла, в качестве которых выступают крупномасштабные очаги выхолаживания ВДС океана, установленные в северных районах Атлантического и Тихого океанов, а также в каждом из секторов Южного океана.

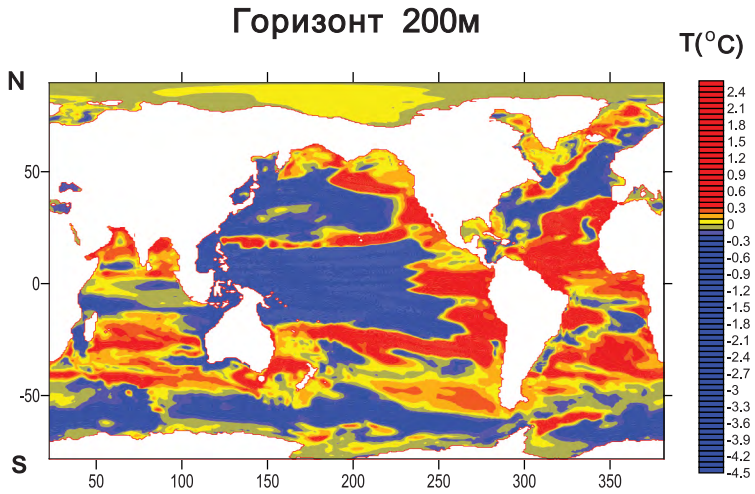

Рис. 5. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 200 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

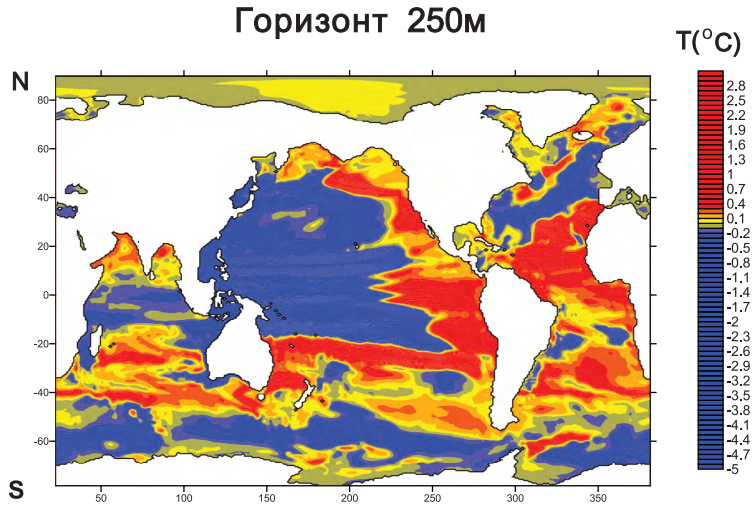

Рис. 6. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 250 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

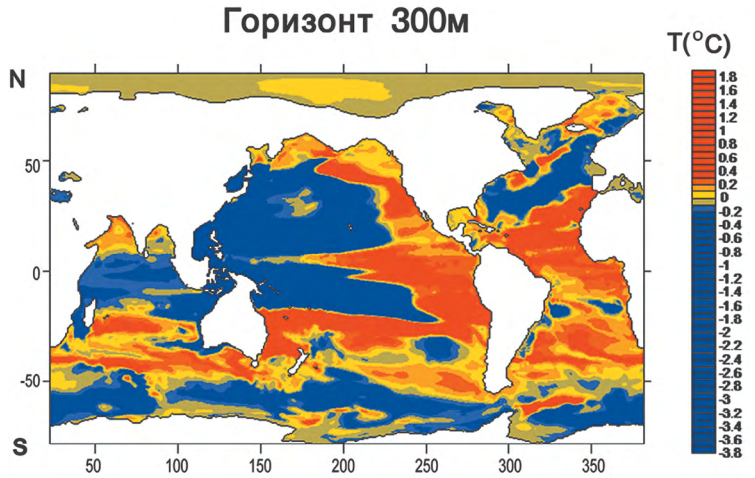

Рис. 7. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 300 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

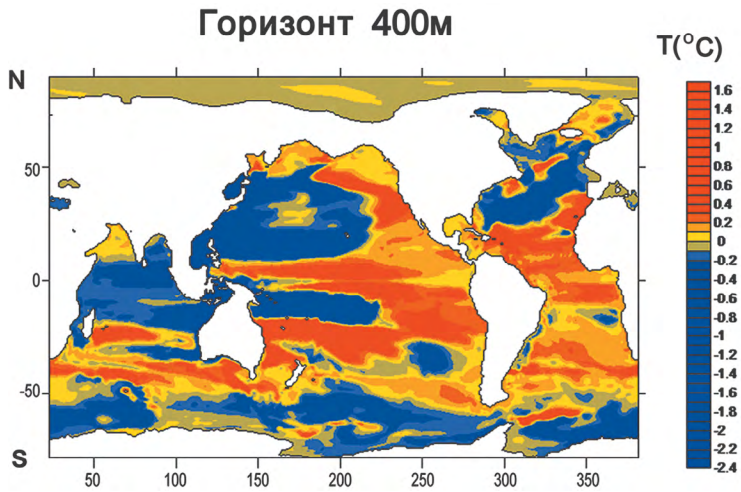

Рис. 8. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 400 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

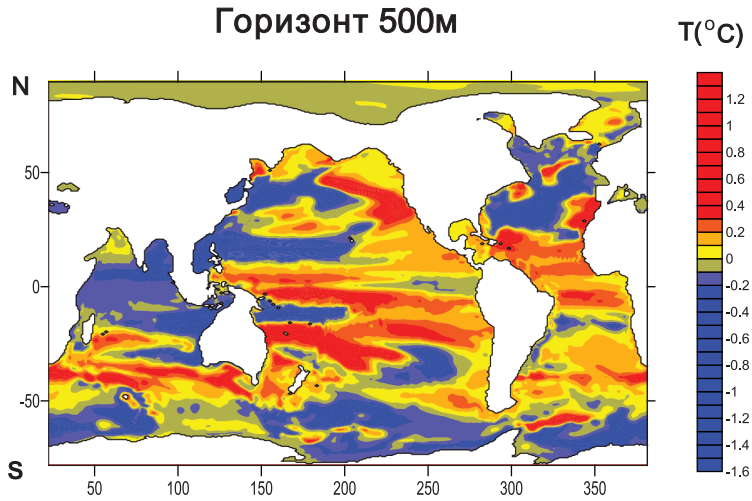

Рис. 9. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 500 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

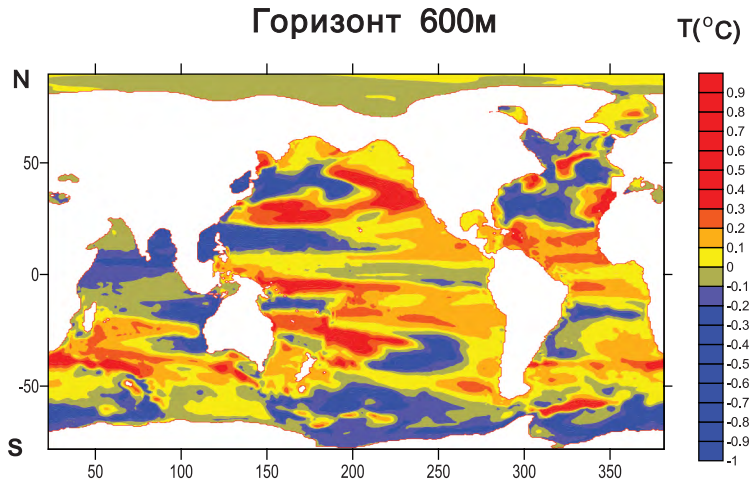

Рис. 10. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 600 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

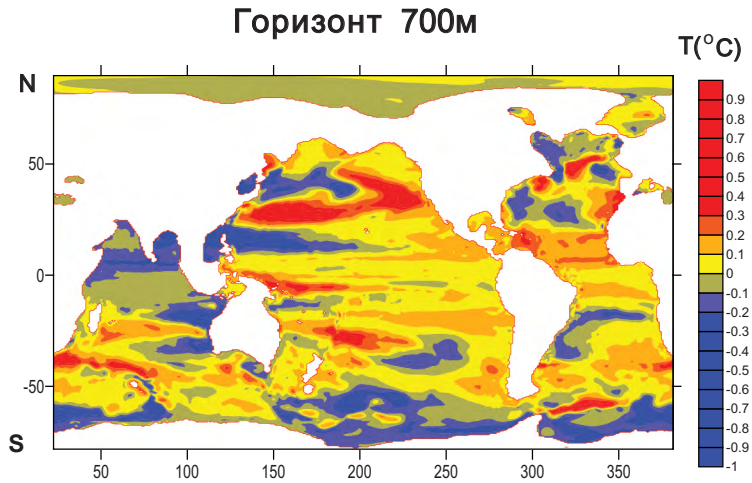

Рис. 11. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 700 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

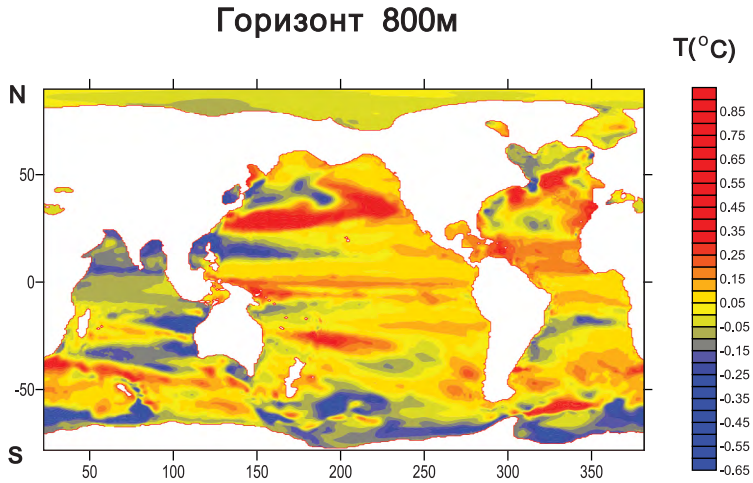

Рис. 12. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 800 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

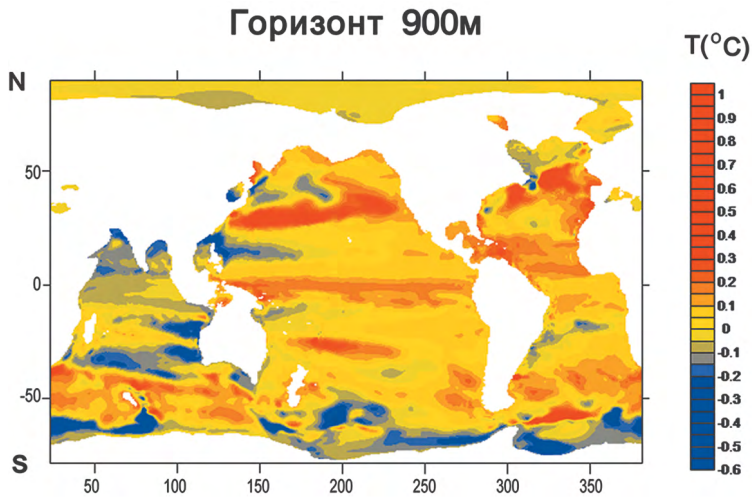

Рис. 13. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 900 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

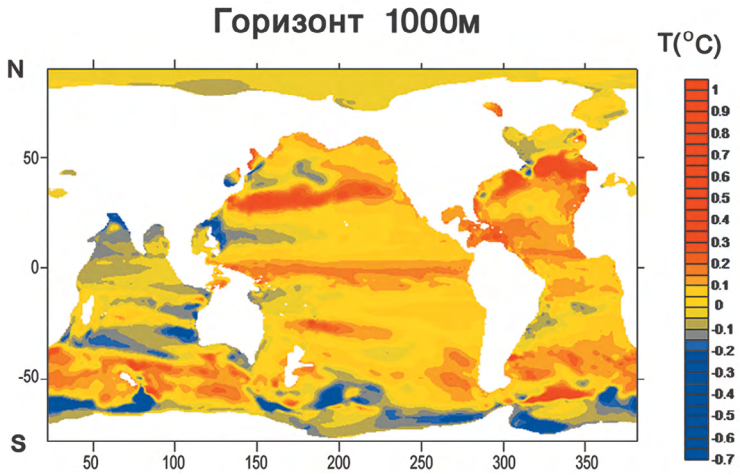

Рис. 14. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 1000 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

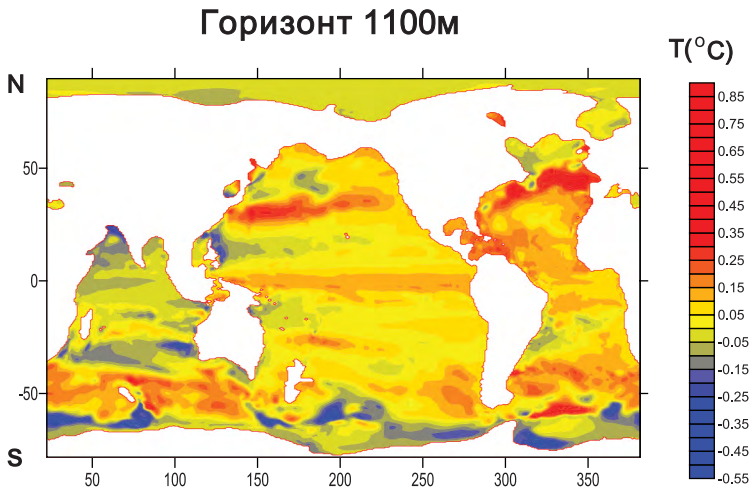

Рис. 15. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 1100 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

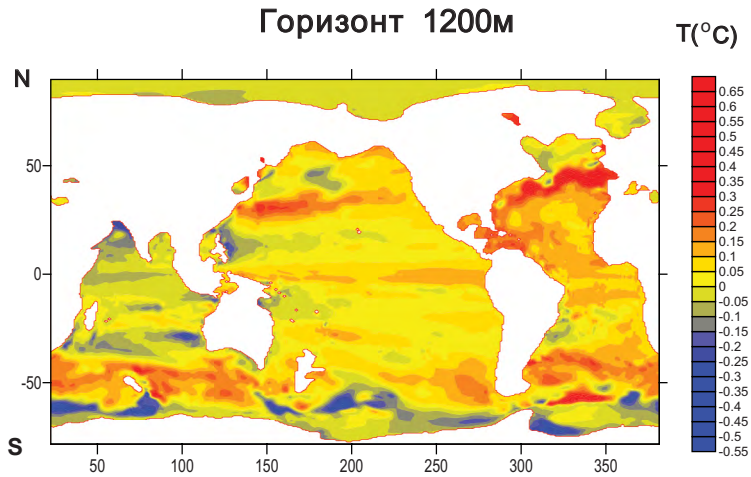

Рис. 16. Мультидекадные возмущения поля температуры (ºС) Мирового океана на горизонте 1200 м от фазы 1948–1974 гг. к фазе 1975–1999 гг.

Однако в Южном океане, из-за наличия теплого промежуточного слоя, выхолаживание вод хорошо выражено не на поверхности, а в промежуточном и глубинном слоях. Обращают на себя внимание положительные возмущения температуры воды в Мировом океане у западных границ континентов, что может быть обусловлено ослаблением интенсивности апвеллингов в фазу тепловой разгрузки ВДС океана.

Структура МОСТОК представляет собой совокупность наблюдаемых положительных и отрицательных крупномасштабных возмущений поля температуры в верхнем деятельном слое Мирового океана, сопряженных с основными элементами общей циркуляции Мирового океана (Океанология. Физика океана, 1978). К ним относятся системы течений: Гольфстрим, Куросио, Антарктическое Циркумполярное и др., зоны дивергенций: субполярной, северной и южной тропических, антарктической и конвергенций: северных субтропической и тропической, южных субтропической и тропической каждого из океанов, апвеллинги на западных границах континентов и пр. Обращает на себя внимание определенное различие структур неоднородностей в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах, что, вероятно, связано не только с особенностями самих океанов (например, их стратификацией) и с неравномерностью распределения континентов, но также и с характером процессов взаимодействия ВДС океана с пограничным слоем атмосферы – либо доминируют потоки из океана в атмосферу, либо из атмосферы в океан. Следует отметить удовлетворительное согласование результатов численного моделирования и диагностических расчетов по данным реанализа (Бышев и др., 2009) фазовых возмущений поля приповерхностной температуры Северного полушария.

Фазовая траектория разностей потоков тепла между южными и северными районами в Тихом и Атлантическом океанах выявила взаимосвязь термодинамических процессов в двух океанах, выраженную мультидекадным циклом, временной масштаб которого составил не менее 20–25 лет. Инструментальные наблюдения, выполненные в эксперименте Атлантэкс–90 в фазу тепловой разгрузки ВДС Мирового океана (1975–1999 гг.), указали (Бышев, 2003) на усиление циркуляции вод в системе Гольфстрим (Ivanov et al., 2019), аномально высокий расход Северо-Атлантического течения (Бышев и др., 1993), интенсификацию трансфронтального обмена (Бышев, Усыченко, 1995), развитие глубокой конвекции (Бышев, Орлов, 1993).

Анализ карт возмущений температуры воды в Мировом океане между фазами климата 1948–1974 гг. и 1975–1999 гг. (рис. 1–10) позволяет обратить внимание на особенность структуры МОСТОК, характеризующуюся интенсификацией конвергенции в центрах северного и южного антициклонических круговоротов Атлантического океана, что выражено в формировании положительных аномалий теплосодержания тропических вод в верхнем 600-метровом слое. Одновременно с этим в Тихом океане обозначена противоположная тенденция: конвергенция в центрах соответствующих круговоротов ослабевает, что, в свою очередь, выражается в сокращении теплосодержания тропических вод бассейна. Это согласуется с диагностическими расчетами, выполненными ранее (Бышев и др., 2001). На основе анализа

многолетних рядов (1961–1993 гг.) среднегодовых значений поверхностной температуры и потоков тепла северных акваторий Атлантического и Тихого океанов установлено, что временной ход разностей потоков тепла между приэкваториальными и средними широтами в Тихом и Атлантическом океанах находятся в противофазе. Следует отметить хорошее согласие изменчивости полей температуры в регионе Северной Атлантики, представленной в нашем анализе, с результатами исследования динамики Атлантической меридиональной осцилляции (АМО), полученными в исследовании (Дианский, Багатинский, 2019).

Интерес представляют очаги выхолаживания вод вдоль антарктического шельфа и у кромки континентального склона, которые, очевидно, соответствуют местоположению источников генерации донной антарктической воды. Возникает возможность проверить гипотезу о наличии фаз климата с интенсивным формированием донной воды (1975–1999 гг.) и фаз климата со значительным ослаблением этого процесса. Выполненные ранее исследования (Алейник и др., 2004), показали, что донные антарктические воды подходят к каналу Вима, связывающему Аргентинскую и Бразильскую донные котловины цепочкой вихрей, масштабы которых соответствуют синоптическим. Скорости течений при проходе вихрей через канал (глубина 4150 м) значительно возрастают (до 66 см/с), а температура понижается (на 0.1 ºС).

Заключение

Наблюдаемая фазовая мультидекадная изменчивость современного климата характеризуется определенной ритмичностью и реализуется при участии соответствующих планетарных структур: Мультидекадной осцилляции теплосодержания океана (МОСТОК) и Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО). Отдельный ритм климата продолжается около 60 лет и состоит из двух фаз по 25–35 лет, качественно отличающихся одна от другой: одна из фаз относительно влажная, а другая существенно континентальная. Межфазовый переход определяется резкой сменой текущего климата и воспринимается как климатический сдвиг, прогноз которого возможен и чрезвычайно важен. Установлено, что источником мультидекадной фазовой изменчивости климата является теплосодержание ВДС Мирового океана. В работе показано, что МОСТОК представляет собой структуру с крупномасштабными очагами квазисинхронного выхолаживания вод в северных частях Атлантического и Тихого, а также Южного океанов, которые являются источниками тепла, эпизодически инициирующими усиление западного переноса теплых и влажных воздушных масс с океана на континенты, изменяя климат последних. Открытие таких структур как МОСТОК и ГАО позволяет переосмыслить и связать ряд важных экспериментальных результатов, полученных ранее в исследованиях на полигонах и по программе «Разрезы».

Механизм изменчивости современного климата, важной особенностью которого является наблюдаемая его ритмичность, реализуется следующим образом. Выходы арктических воздушных масс в течение фазы 1975–1999 гг. на теплые северо-атлантические и северо-тихоокеанские воды приводят к интенсификации теплообмена

океана с атмосферой, генерации циклонов в атмосфере и усилению западного переноса теплых и влажных воздушных масс на Евроазиатский и Северо-Американский континенты. При значительном и многолетнем обмене теплом и влагой океана с атмосферой, в районе источника тепла в океане развивается глубокая конвекция, которая увеличивает мощность водного слоя, взаимодействующего с атмосферой, а над районом интенсивного теплообмена формируется значительная облачность, сокращая приток коротковолновой солнечной радиации к поверхности океана, что в результате не компенсирует наблюдаемые потери тепла (эксперименты Мегаполигон и Атлантэкс–90). На континентах возникает фаза относительно влажного климата. Многолетний процесс выхолаживания океана с одной стороны и увеличение в океане слоя взаимодействия с другой, влекут за собой ослабление циклогенеза в атмосфере и как следствие – его прерывание, а вместе с тем, – прерывание глубокой конвекции и сокращение облачности в данном районе. Океан вступает в фазу восстановления своего начального теплосодержания ВДС, которая занимает несколько десятилетий. На материках устанавливается фаза более континентального климата. После восстановления ВДС своего начального теплового состояния океан вновь оказывается способным к своей очередной тепловой разгрузке.

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за ценные замечания, учет которых способствовал улучшению текста статьи.

Исследования мультидекадной осцилляции теплосодержания Мирового океана выполнены в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, тема № 0149-2019-0002, расчеты по воспроизведению термогидродинамических полей Мирового океана проведены при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-17-01295).

Литература

Алейник Д.Л., Бышев В.И., Нейман В.Г. Об изменчивости термодинамических характеристик океана на больших глубинах // ДАН. 2004. Т. 397. № 4. С. 534–539.

Анисимов М.В., Бышев В.И., Залесный В.Б., Мошонкин С.Н. Мультидекадная изменчивость термической структуры вод Северной Атлантики и ее климатическая значимость // ДАН. 2012. Т. 443. № 3. С. 372–376.

Бышев В.И. Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы. М.: Наука, 2003. 343 с.

Бышев В.И., Кононова Н.К., Нейман В.Г., Романов Ю.А. Количественная оценка параметров климатической изменчивости системы океан–атмосфера // Океанология. 2004. Т. 44. № 3. С. 341–353.

Бышев В.И., Кононова Н.К., Нейман В.Г., Романов Ю.А. Особенности динамики климата Северного полушария в XX столетии // ДАН. 2002. Т. 384. № 5. С. 674–681.

Бышев В.И., Нейман В.Г., Позднякова Т.Г., Романов Ю.А. Новые данные о термодинамическом режиме климатической системы в Северном полушарии // ДАН. 2001. Т. 381. № 4. С. 539–544.

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 пространственной неоднородности некоторых параметров глобальной изменчивости современного климата // ДАН. 2009. Т. 426. № 4. С. 543–548.

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., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В., Сонечкин Д.М. О статистической значимости и климатической роли Глобальной атмосферной осцилляции // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 179–185.

Бышев В.И., Нейман В.Г., Сидорова А.Н., Серых И.В., Анисимов М.В. Об особенностях изменчивости современного климата // В сборнике: Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы VI Международной научной конференции; Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. Красноярск, 2019. С. 189–192.

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., Серых И.В., Сидорова А.Н., Скляров В.Е., Анисимов М.В. Океанический фактор мультидекадной изменчивости современного климата и перспективы ее мониторинга // Океанологические исследования. 2018. Т. 46. № 3. С. 5–19.

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 // ДАН. 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.

Гусев А.В., Дианский Н.А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948–2007 гг. с помощью модели INMOM // Изв. РАН, Сер. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 3–15.

Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.

Дианский Н.А., Багатинский В.А. Термохалинная структура вод Северной Атлантики в различные фазы Атлантической мультидекадной осцилляции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 157–170.

Океанология. Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана. М.: Наука, 1978. 455 с.

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. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).6.

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. DOI: 10.1029/2003GL018597.

Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // J. Geoph. Res. 1999. Vol. 104. No. C1. P. 1537–1540.

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. DOI: 10.1007/s00024-017-1557-3.

De Viron O., Dickey J.O., Ghil M. Global modes of climate variability // Geophyscal Research Letters. 2013. Vol. 40. P. 1832–1837. DOI: 10.1002/grl.50386.

Hayasaka H., Yamazaki K., Naito D. Weather conditions and warm air masses during active fire-periods in boreal forests // Polar Science. 2019. Vol. 22:100472. P. 1–7.

Ivanov Yu.A., Byshev V.I., Romanov Yu.A., Sidorova A.N. On the structure of the North Atlantic Current in May–June 1990 // Journal of Oceanological Research. 2019. Vol. 47. No. 2. P. 33–63. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).4.

Kim H., An S.-I. On the subarctic North Atlantic cooling due to global warming // Theor. Appl. climatol. 2013. Vol. 114. No. 1–2. P. 9–19. DOI: 10.1007/s00704-012-0805-9.

Lee T., 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. DOI: 10.1029/2007 GL032419j.

Mao K., Chen J., Li Z., Ma Y., Song Y., Tan X., Yang K. Global Water Vapor Content Decreases from 2003 to 2012: An Analysis Based on MODIS Data // Chin. Geogra. Sci. 2017. Vol. 27. No. 1. P. 1–7. DOI: 10.1007/s11769-017-0841-6.

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.

Nakamura M. Greenland sea surface temperature change and accompanying changes in the North Hemispheric climate // Journal of. Climate, 2013, Vol. 26, P. 8576–8596. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00435.1.

Serykh I.V., Sonechkin D.M., Byshev V.I., Neiman V.G. Global Atmospheric Oscillation in geopotential fields of the free atmosphere // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 386. 012006. DOI: 10.1088/1755–1315/386/1/012006. https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/386/1.

Stephens C., Levitus S., Antonov J., Boyer T.P. On the Pacific Ocean regime shift // Geophysical Research Letters. 2001. Vol. 28 (19). P. 3721–3724.

Tsonis A.A., Swanson K., Kravtsov S. A new dynamical mechanism for major climate shifts // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. L13705. DOI: 10.1029/2007 GL030288.

Wang G., Swanson K.L., Tsonis A.A. The pacemaker of major climate shifts // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. L07708. DOI: 10.1029/2008 GL036874.

ON THE MULTI-DECADAL OSCILLATION OF THE HEAT CONTENT OF THE WORLD OCEAN

Byshev V.I.[1], Anisimov M.V.[1], Gusev A.V.[1,2], Gruzinov V.M.[3], 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 Sciences,
8, ul. Gubkina, Moscow, 119333, Russia, e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com,
[3]N.N. Zubov's State Oceanographic Institute of Roshydromet,
6, Kropotkinsky per., Moscow, 119034, Russia, e-mail: polarf@meteo.ru
Submitted 30.07.2020, accepted 23.10.2020.

Multi-decade rhythmicity is one of the most important features of the dynamics of the modern climate. The rhythm of 1940–1999 was a two-phase structure in which the initial phase (1940–1974) was essentially continental, and the final phase (1975–1999) was relatively wet. The transition of the climate from the continental phase to the humid one in the mid-70s of the twentieth century was "sudden" and recognized as a climate shift. A certain globality and quasi-synchronicity of multi-decade climate changes is realized with the participation of planetary thermodynamic structures both in the ocean and in the atmosphere of two the most important components of the climate system. The presence of a Global atmospheric oscillation was discovered and studied in detail. This paper offers the first attempt to consider the content and features of the planetary multi-decadal oscillation of the heat content of the World Ocean. The analysis of ocean oscillation is based on the results of numerical simulation of the World Ocean water circulation in the period from 1948 to 2007 using the model of the Marchuk Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences. The differences in the average water temperature fields in the upper 1200-meter layer, calculated for two opposite phases of the oscillation, revealed the main features of its structure.

Keywords: World ocean, atmosphere, modern climate, temperature, upper active layer, deep convection, circulation

Acknowledgment: The authors are grateful to the reviewers for valuable comments, the consideration of which contributed to the improvement of the article text.

Studies of the multi-decadal oscillations of the heat content of the World Ocean were carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Oceanology named after P.P. Shirshov RAS, issue No. 0149-2019-0002, calculations for the reproduction of Thermohydrodynamics fields of the World Ocean were carried out with the support of the Russian Science Foundation (grant No. 17-17-01295).

References

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, pp. 263–267.

Aleinik D.I., Byshev V.I., and Neiman V.G. Variability of thermodynamic characteristics in the deep ocean. *Doklady Earth Sciences*, 2004, Vol. 397, No. 6, pp. 829–833, [In Russian].

Anisimov, M.V., Byshev, V.I., Zalesniy, V.B., and Moshonkin, S.N. Multi-decade variability of the North-Atlantic Ocean thermal structure and its climate significance, *Doklady Earth Sciences,* 2012, Vol. 443, No. 3, pp. 372–376.

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

Brydon D., San S., and Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models. *J. Geoph. Res.*, 1999, Vol. 104, No. C1, pp. 1537–1540.

Byshev V.I. and Orlov V.S. O prirode vnutritermoklinnoj linzy na subpolyarnom fronte v Severnoj Atlantike (On the nature of an intrathermocline lens at the subpolar front in the Northern Atlantic ocean*). Okeanologiya,* 1993, Vol. 33, No. 3, pp. 340–346, [In Russian].

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

Byshev V.I. and Usychenko I.G. Teplovoe sostoyanie vod v del'te Gol'fstrima v Mae–Iyune 1990 g. (Thermal state of water in the Gulf stream Delta in May–June 1990). *DAN,* 1995*,* Vol. 341, No. 4, pp. 542–544.

Byshev V.I. Sinopticheskaja i krupnomasshtabnaja izmenchivost' okeana i atmosfery (Synoptical and large-scale variability of ocean and the atmosphere). Moscow: Nauka, 2003, 343 p., [In Russian].

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

Byshev V.I., Figurkin A.L., and Anisimov I.M. 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*, 2016, Vol. 185, pp. 215–227, [In Russian].

Byshev V.I., Kononova N.K., Neiman V.G., and Romanov Yu.A. Quantitative assessment of the parameters of the sea-air system climatic variability. *Oceanology*, 2004, Vol. 44, No. 3. pp. 315–326, [In Russian].

Byshev V.I., Kononova N.K., Neiman V.G., and Romanov Yu.A. Peculiarities of the Climate Dynamics in the Northern Hemisphere in the 20th Century. *Doklady Earth Sciences*, 2002, Vol. 385, pp. 538–545.

Byshev V.I., Neiman V.G. and Romanov Yu.A. Klimaticheskie ritmy teplovogo rezhima Mirovogo okeana (Climate rhythms of the thermal regime of the World Ocean). *Priroda,* 2016, No. 8, pp. 26–33, [In Russian].

Byshev V.I., Neiman V.G., and Romanov Yu.A. Discrepancy of global climate change over continents and oceans. *Doklady Earth Sciences*, 2005, Vol. 400, No. 1, pp. 77–83, [In Russian].

Byshev V.I., Neiman V.G., and Romanov Yu.A. On the essential differences between the large-scale variations of the surface temperature over the oceans and continents. *Oceanology*, 2006, Vol. 46, No. 2, pp. 147–158, [In Russian].

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

Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Y.A., Serykh I.V., and Sonechkin D.M. Statistical significance and climatic role of the global atmospheric oscillation. *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 165–171, [In Russian].

Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Pozdnyakova T.G. New data on the thermodynamic regime of the climatic system in the Nothern hemisphere. *Doklady Earth Sciences*, 2001, Vol. 381, pp. 1077–1082, [In Russian].

Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Serykh I.V. Global'nye atmosfernye oscilljacii v dinamike sovremennogo klimata (Global atmospheric oscillations in the dynamics of modern climate). *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa,* 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 62–71, [In Russian].

Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Serykh I.V. On the spatial nonuniformities of some parameters of the global variations of the recent climate. *Doklady Earth Sciences,* 2009, Vol. 426, No. 4, pp. 705–709, [In Russian].

Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., and Serykh I.V. Phase variability of some characteristics of the present-day climate in the Northern Atlantic region. *Doklady Earth Sciences,* 2011, Vol. 438, No. 2, pp. 887–892, [In Russian].

Byshev V.I., Neiman V.G., Sidorova A.N., Serykh I.V., and Anisimov M.V. Ob osobennostjah izmenchivosti sovremennogo klimata (About the peculiarities of the modern climate variability), V sbornike: Regional'nye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli. *Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (Proceedings of the VI International scientific conference: Regional problems of remote sensing of the Earth).* Siberian Federal University, Institute of space and information technologies. Krasnoyarsk, 2019, pp. 189–192, [In Russian].

Byshev V.I., Serykh I.V., Sidorova A.N., Skljarov V.E., and Anisimov M.V. Oceanic factor of multi-decadal variability of modern climate and prospects for its monitoring. *Journal of Oceanological Research,* 2018, Vol. 46, No. 3, pp. 5–19, doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(3).1.

De Viron O., Dickey J.O., and Ghil M. Global modes of climate variability. *Geophyscal Research Letters,* 2013, Vol. 40, pp. 1832–1837, doi: 10.1002/grl.50386.

Diansky N.A. Modelirovanie cirkuljacii okeana i issledovanie ego reakcii na korotkoperiodnye i dolgoperiodnye atmosfernye vozdejstvija (Simulation of ocean circulation and study of its response to short-and long-period atmospheric effects). Moscow: Fizmatlit, 2013, 272 p.

Diansky N.A. and Bagatinsky V.A. Thermohaline Structure of Waters in the North Atlantic in Different Phases of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics,* 2019, Vol. 55, No. 6, pp. 628–639.

Gusev A.V. and Diansky N.A. Numerical simulation of the world ocean circulation and its climatic variability for 1948–2007 using the INMOM. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics,* 2014, Vol. 50, No. 1, pp. 1–12, doi: 10.7868/S0002351513060072, [In Russian].

Hayasaka H., Yamazaki K., and Naito D. Weahter conditions and warm air masses duiring active fire-periods in boreal forests. *Polar Science,* 2019, 22(2019)100472, pp. 1–7.

Ivanov Yu.A., Byshev V.I., Romanov Yu.A., and Sidorova A.N. On the structure of the North Atlantic Current in May–June 1990. *Journal of Oceanological Research,* 2019, Vol. 47, No. 2, pp. 33–63, doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).4.

Kim H. and An S.-I. On the subarctic North Atlantic cooling due to global warming. *Theor. Appl. climatol.,* 2013, Vol. 114, No. 1–2, pp. 9–19, doi: 10.1007/s00704-012-0805-9.

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, doi: 10.1029/2007 GL032419j.

Mao K., Chen J., LI. Z., Ma Y., Song Y., Tan X., and Yang K. Global Water Vapor Content Decreases from 2003 to 2012: An Analysis Based on MODIS Data. *Chin. Geogra. Sci.,* 2017, Vol. 27, No. 1, pp. 1–7, doi: 10.1007/s11769-017-0841-6.

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

Nakamura M. Greenland sea surface temperature change and accompanying changes in the North

Hemispheric climate. *Journal of Climate*, 2013, Vol. 26, pp. 8576–8596, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00435.1.

Okeanologiya. Fizika okeana, Vol. 1: Gidrofizika okeana (Oceanology. Ocean physics, Vol. 1: Hydrophysics of the ocean), Moscow: Nauka, 1978, 455 p., [In Russian].

Romanov Yu.A., Neiman V.G., Byshev V.I., Serykh I.V., Sonechkin D.M., Gusev A.V., Kononova N.K., Ponomarev V.I., Sidorova A.N., Figurkin A.L., and Anisimov M.V. Overall assessment of the statistical value and climate role of global atmospheric and oceanic oscillations. *Journal of Oceanological Research,* 2019, Vol. 47, No. 2, pp. 76–99, doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).6, [In Russian].

Serykh I.V., Sonechkin D.M., Byshev V.I., and Neiman V.G. Global Atmospheric Oscillation in geopotential fields of the free atmosphere. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 2019, Vol. 386: 012006, doi: 10.1088/1755-1315/386/1/012006, https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/386/1, [In Russian].

Stephens C., Levitus S., Antonov J., and Boyer T.P. On the Pacific Ocean regime shift. *Geophysical Research Letters,* 2001, Vol. 28 (19), pp. 3721–3724.

Tsonis A.A., Swanson K., and Kravtsov S. A new dynamical mechanism for major climate shifts. *Geophysical Research Letters,* 2007, Vol. 34, L13705, doi: 10.1029/2007 GL030288.

Wang G., Swanson K.L., and Tsonis A.A. The pacemaker of major climate shifts. *Geophysical Research Letters,* 2009, Vol. 36, L07708, doi: 10.1029/2008 GL036874.