

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

В. И. Бышев¹, А. В. Гусев^{1,2}, А. Н. Сидорова¹

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*

Современный климат – это климат текущего столетия с присущими ему характерными особенностями. Океан и атмосфера при этом рассматриваются в качестве двух важнейших компонентов климатической системы. Динамика и термодинамика этих сфер отражают текущие возмущения планетарной окружающей среды на внутридекадных (2–8 лет) и мультидекадных (20–60 лет) временных масштабах. Квазисинхронность и глобальность происходящих в современной климатической системе явлений обеспечиваются и сопровождаются выявленными и в атмосфере, и в океане структурами планетарного масштаба: соответственно Глобальной атмосферной осцилляцией (ГАО) и Мультидекадной осцилляцией теплосодержания океана (МОСТОК).

Характерной особенностью динамики современного климата является наблюдаемая его мультидекадная ритмичность с периодом около 60 лет. 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. Поиск источника наблюдаемой изменчивости современного климата позволил установить, что теплосодержание верхнего деятельного слоя (ВДС) Мирового океана (МО) демонстрирует мультидекадные фазы теплонакопления и тепловой разгрузки, согласующиеся с мультидекадными фазами возмущений климата. Следует отметить, что фаза теплонакопления ВДС МО соответствует континентальному климату, а его тепловая разгрузка – относительно влажному. В качестве механизма наблюдаемой мультидекадной фазовой изменчивости современного климата выступает планетарное внутрисистемное перераспределение тепла между МО и континентами, при котором общая циркуляция атмосферы играет роль посредника.

Проблемы, обсуждаемые нами, разрабатывались в течение многих лет совместно с такими выдающимися учеными-океанологами как В. Г. Нейман и Ю. А. Романов. Данную статью посвящаем светлой памяти этих ученых.

Ключевые слова: современный климат, океан, атмосфера, Глобальная атмосферная осцилляция (ГАО), планетарная океаническая осцилляция, фазы климата

Введение

Изменчивость современного климата – это на текущий момент одна из наиболее важных проблем в науках о Земле. Выявленная разнонаправленность изменения климатических характеристик в океанах и на континентах (Бышев, Нейман, Романов, 2006) позволила сформулировать гипотезу о современном внутрисистемном перераспределении тепла между Мировым океаном и континентами при посредничестве атмосферы, ее общей циркуляции.

Вызывают озабоченность наблюдаемые стремительные планетарные изменения природной среды, произошедшие в 1970-е годы (Minobe, 1997; 1999) и получившие название «климатический сдвиг». Подобные климатические изменения происходят не только в современной истории (в конце 1930-х – начале 1940-х годов, в середине 70-х годов XX века и на рубеже XX–XXI столетий (Бышев и др., 2011; Пономарев и др., 2018)), но, очевидно, также наблюдались в прошлом (Feng et al., 2008; Razjigaeva et al., 2023) и, вероятно, будут происходить в будущем. Качественные фазовые переходы природной среды от состояния относительно влажного глобального климата к существенно континентальному, а затем вновь к фазе влажного и т. д. заслуживали специального изучения их природы и источника.

Существенные изменения климатических характеристик сопровождаются их крупномасштабными аномалиями одного или другого знака, а следовательно, влияют на результаты хозяйственной деятельности огромных территорий и государств, на них расположенных. В связи с этим обсуждаемая проблема является актуальной и представляет существенную фундаментальную значимость и практическую ценность.

Наблюдаемая фазовая мультидекадная изменчивость крупномасштабного теплообмена между океанами и континентами, признаки которого в Северном полушарии в явном виде были установлены в (Бышев, Нейман, Романов, 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: теплосодержание ВДС сокращается (Бышев, Фигуркин, Анисимов, 2016). Обнаруженная определенная ритмичность современного климата (Бышев и др., 2011; Бышев, Нейман, Романов, 2016; Cheng et al., 2023) с чередованием его относительно влажных фаз, например, (1905–1935) и (1975–1999), с существенно континентальными (1940–1974) и (2000–2022 ...) фазами, соответствуют периодам тепловой разгрузки и теплонакопления ВДС Мирового океана (Byshev et al., 2017; Романов и др., 2019; Дианский, Багатинский, 2019).

Используя результаты предшествующих исследований (Agee, 1991; Hansen and Lebedeff, 1987; 1988) удалось показать, что в многолетний период потепления в Северном полушарии с 1905 по 1940 гг. число циклонов за год в США росло, как и число циклонов в Северной Америке в январе и июле (Hosler and Gamage, 1956), а в многолетний период похолодания, по крайней мере, с 1950 по 1977 гг. число циклонов

в Северной Америке сокращалось (Zishka, Smith, 1980). В исследованиях (McCabe et al., 2001) показано, что после сдвига климатического режима в конце 70-х увеличилось количество циклонов в холодный период года (с ноября по март) в высоких широтах Северного полушария (60° – 90° с. ш.) и уменьшилось в средних широтах (30° – 60° с. ш.). При этом интенсивность циклонов увеличилась как в высоких, так и в средних широтах.

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 Пацифики (Kim, An, 2013), осцилляции теплосодержания ВДС в информативных районах Атлантического, Тихого и Южного океанов (Byshhev et al., 2017). Несомненно, что глобальные связи (De Viron et al., 2013) в системе океан–атмосфера–континент способны обеспечить такие планетарные структуры как ГАО и МОСТОК, причем первая, очевидно, синхронизирует все известные региональные атмосферные осцилляции, а вторая – океанические осцилляции.

Отдельный ритм современного климата длится около 60 лет и, как уже отмечалось выше, состоит из двух качественно различающихся фаз: континентальной и влажной. Смена фаз климата возникает, на первый взгляд, неожиданно и совершается в течение нескольких лет, что воспринимается как климатический сдвиг (Bond et al., 2003; Stephens et al., 2001; Tsonis, Swanson, 2007; Wang, Swanson, Tsonis, 2009). Текущая фаза климата, переход к которой произошел на рубеже XXI столетия, является континентальной. Она определяется рядом характерных признаков, наиболее значительным из которых является сокращение влажности планетарной атмосферы (Mao et al., 2017), что способствует увеличению пожароопасности и, как следствие, повсеместному распространению природных лесных пожаров (Hayasaka, Yamazaki, Naito, 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, Фигуркин, Анисимов, 2017), материалы численного моделирования (Гусев, Дианский, 2014) и данные крупномасштабных гидрофизических экспериментов: Полигон-70, ПОЛИМОДЕ, Мегаполигон, Атлантэкс-90 (Бышев, 2003) позволили установить, что смена фаз климата представляет собой смену режима теплообмена океана и атмосферы в глобальном плане: океан последовательно из фазы теплонакопления ВДС переходит в фазу тепловой разгрузки, а затем вновь к фазе теплонакопления и т. д. Подобные фазовые переходы климатической системы, очевидно, совершались в 1935–1940 гг., в 1973–1977 гг., на рубеже XX–XXI столетий (Бышев и др., 2011; Henley et al., 2015), и, вероятно, очередной сдвиг может произойти уже в текущую декаду. Глобальные изменения,

естественно, должны сопровождаться проявлением планетарных структур как в океане, так и в атмосфере. В атмосфере таковой структурой является Глобальная Атмосферная Осцилляция (Бышев и др., 2014). Важные особенности ГАО и ее статистическая значимость были детально рассмотрены (Бышев и др., 2016; Serykh et al., 2019). В океане были выявлены признаки наличия планетарной осцилляции МОСТОК, структура и особенности которой рассмотрены в ряде работ (Byshev et al., 2017; Романов и др., 2019; Бышев и др., 2020), где установлены ее основные океанические источники тепла: их местоположение и значимость.

Явления и процессы, сопровождающие климатические сдвиги

Характерной особенностью динамики современного климата (Бышев, Нейман, Романов, 2016) является его мультидекадная ритмика с временным масштабом около 60 лет. Внимание на подобную изменчивость климата обращено в ряде исследований. В работах Н. С. Сидоренкова, например, (Sidorenkov, 2009; 2016) акцент сделан на зависимость изменчивости погоды и климата от астрономических факторов. В нашем исследовании также подчеркивается определяющая роль естественных процессов в наблюдаемой динамике текущих изменений климата. Другой важной особенностью современного климата следует считать наличие климатических сдвигов: стремительные фазовые переходы климата, неоднократно наблюдаемые в течение последних 100–150 лет, в качественно новое состояние. Подобная динамика современного климата сопровождается целым рядом доминирующих явлений и процессов в климатической системе. В качестве таковых в атмосфере, например, являются: меридиональные северные и южные переносы воздушных масс, облачность, осадки и др. В океане обращают на себя внимание такие явления и процессы, как глубокая плотностная конвекция, обеспечивающая теплообмен верхнего деятельного слоя океана (ВДСО) с атмосферой, интенсификация трансфронтального обмена, изменение циркуляции вод основных систем течений Мирового океана (расходы течений, их меандрирование) и т. д. Названные выше процессы и явления были объектами наблюдений в крупномасштабных гидрофизических экспериментах (Полигон-70, ПОЛИМОДЕ, Мегаполигон, Атлантэкс-90). Это позволяет нам обратиться к результатам экспериментальных данных, которые помогают не только установить, но и оценить их климатическую значимость.

Гидрофизические эксперименты Мегаполигон (субарктическая фронтальная зона северо-западной части Тихого океана, июль–октябрь 1987 г.) и Атлантэкс-90 (нюфаундлендская энергоактивная зона, май–июль 1990 г.), которые были выполнены в двух информативных районах Мирового океана в период его мультидекадной осцилляции теплосодержания (1940–1999 гг.), предоставили возможность получить исключительно важные комплексные инструментальные наблюдения термодинамических процессов в фазу тепловой разгрузки океана (1975–1999 гг.). Эти наблюдения позволили установить характерные аномальные термодинамические состояния

названных акваторий. В частности, были выявлены: крупномасштабные аномалии температуры поверхности в Атлантическом (Бышев, Копрова, Романов, 1996) и Тихом (Бышев, Снопков, 1990) океанах; экстремальные расходы Северо-Атлантического течения (Бышев и др., 1997) и признаки усиления Лабрадорского течения по аномально низкой температуре ($-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) в ядре; интенсификация трансфронтального переноса вод на субарктическом фронте в Тихом океане (Бышев, 2003) и субполярном фронте в Атлантическом (Бышев, Усыченко, 1995); высокие потоки явного и скрытого тепла из океана в атмосферу и, как следствие, аномальное развитие облачного покрова (Бышев, Копрова, Навроцкая и др., 1993); результаты развития в океане глубокой плотностной конвекции (Бышев, Орлов, 1993; Бышев, Фигуркин, Анисимов, 2016).

Климатические сдвиги, которые происходили последние 100–150 лет (Henley et al., 2015), представляли собой, очевидно, фазовые переходы климатической системы из состояния теплонакопления Мирового океана (слоя его главного термоклина) к состоянию тепловой разгрузки этого слоя. Тепловая разгрузка совершалась путем теплообмена верхнего деятельного слоя океана с атмосферой при участии глубокой плотностной конвекции (рисунки 1–4) и трансфронтального обмена в результате бароклинной неустойчивости (рисунок 5). Демонстрацией глубокой конвекции на субполярном фронте в Северной Атлантике в холодный сезон 1989–1990 гг. явилась генерация внутритермоклинной линзы (ВТЛ), обнаруженной и исследованной в ходе эксперимента Атлантэкс-90 (50-й рейс НИС «Академик Курчатов»). ВТЛ располагалась в слое 500–1000 м и имела горизонтальный размер порядка 100 км. Оценки аномалий тепло- и солесодержания, а также содержания кислорода в ВТЛ, составили $3.82 \cdot 10^{19}$ Дж, $8.05 \cdot 10^{11}$ кг и $4.65 \cdot 10^{12}$ л, соответственно (рисунок 1). Вертикальные распределения фосфатов и кислорода (рисунок 4) приведены по измерениям на станциях 6062, 6066 и 6068, расположенных на разрезе через ВТЛ. Зональный разрез температуры воды (вдоль 48° с. ш.) дан на рисунке 2. На этом разрезе представлены: (а) субполярный фронт и ВТЛ, (б) положение и динамика фронта, а также кинематика ВТЛ относительно фронта. Моделирование эволюции термической структуры (рисунок 3) позволило установить природу ВТЛ (глубокая плотностная конвекция), время и местоположение (в феврале 1990 г. на восточной периферии субполярного фронта) ее формирования.

В эксперименте «Атлантэкс-90» (Иванов, Морозов, 1991) две последовательные гидрологические съемки дельты Гольфстрима (02.05.1990–22.05.1990 и 27.05.1990–10.06.1990; $38^{\circ}00' - 42^{\circ}30'$ с. ш., $42^{\circ}00' - 49^{\circ}00'$ з. д.), выполненные НИС «Витязь» и «Профессор Штокман» Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН с высоким пространственно-временным разрешением, позволили наблюдать трансфронтальный перенос полярных вод с западного фланга течения на его восточный фланг. Некоторые результаты анализа этого трансфронтального обмена (Бышев, Усыченко, 1995) представлены на рисунке 5. Характер мультидекадных изменений циркуляции атмосферы Северного полушария в современную эпоху можно понять на основе диагноза векового ряда типов атмосферной циркуляции

Дзердзеевского (Дзердзеевский, 1968; Календарь ..., 1987; Кононова, 2009). Временные изменения отдельных пар групп атмосферной циркуляции приведены на рисунке 6. На нем, в частности, показаны изменения зональных (1+5) и меридиональных южных (3+10 и 4) типов циркуляции. Соотношения балансов меридиональных южных и северных групп циркуляции атмосферы Северного полушария приведены на рисунке 7. Обращает на себя внимание чередование мультидекадных северных и южных фаз типов атмосферной циркуляции над океанами и континентами (кривые 1, 2 и 4 на рисунке 7).

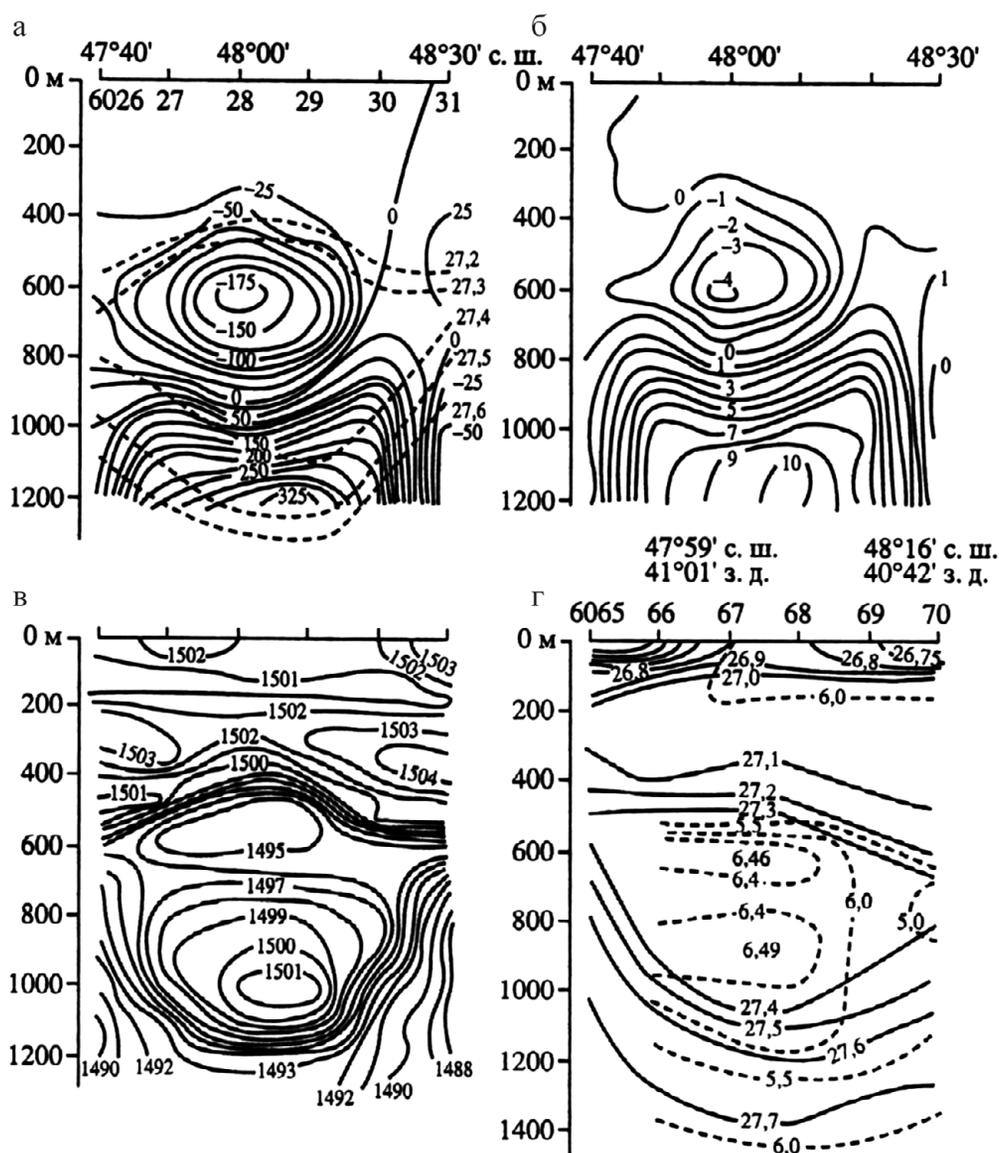


Рис. 1 – Распределение аномалий теплосодержания 10^7 Дж/м² (а) и солесодержания 10^{-1} кг/м² (б), скорости звука м/с (в) и кислорода мл/л (г) на разрезе через линзу. Штриховой линией на (а) нанесены изопикны, а на (г) – распределение кислорода. На верхней шкале (а–в) размечено положение станций 6026–6031 (слева направо), а на (г) станций 6065–6070

Важно отметить, что в фазу увеличения частоты северных меридиональных процессов над океанами наблюдается их сокращение над континентами, причем в эту же фазу частота южных процессов над океанами сокращается, а над континентами растет.

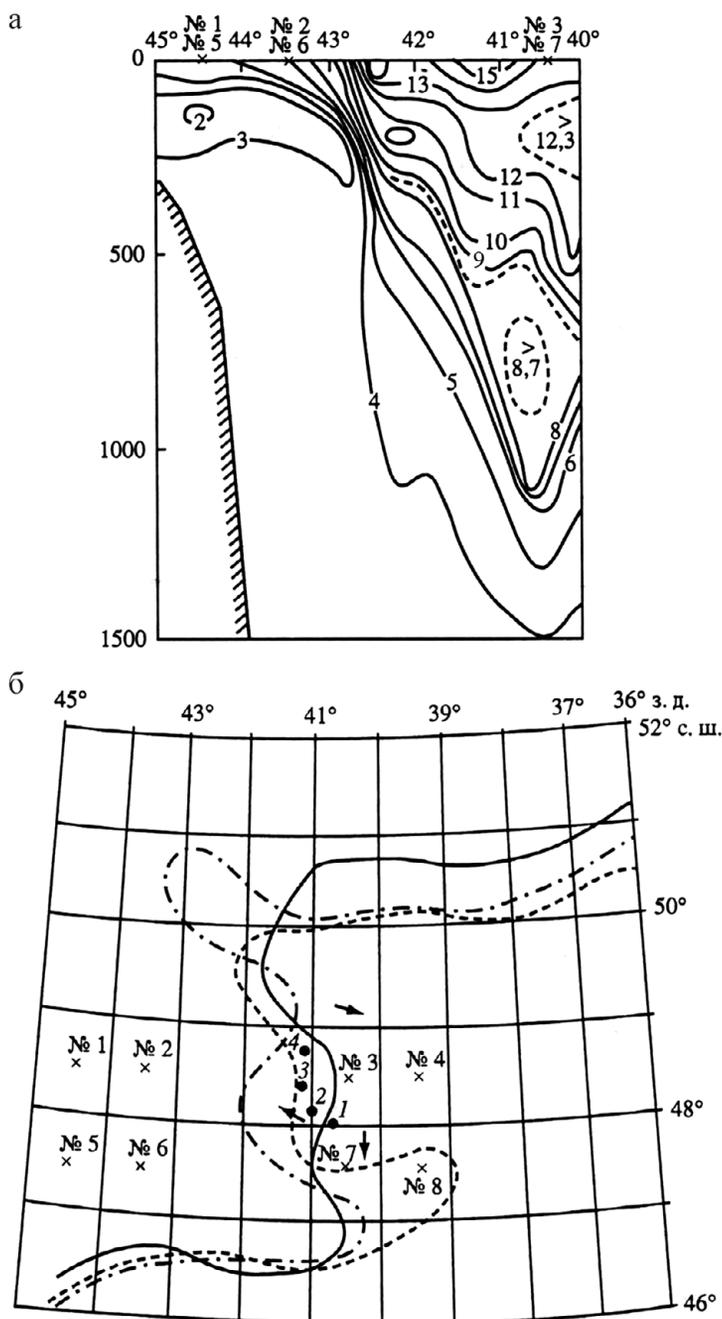


Рис. 2 – Зональный (вдоль 48° с. ш.) разрез температуры (а), выполненный 13.06.1990–15.06.1990 НИС «Академик Курчатов» (50-й рейс), и положение изотермы 12 °С на поверхности океана с 22.06.1990 по 29.06.1990 (б).

Точками указано положение центра линзы «АК-50» на разные даты: 1 – 16.06.1990, 2 – 25.06.1990, 3 – 28.06.1990 и 4 – 30.06.1990; крестиками – центры одноградусных квадратов № 1–8. Стрелками указаны измеренные течения

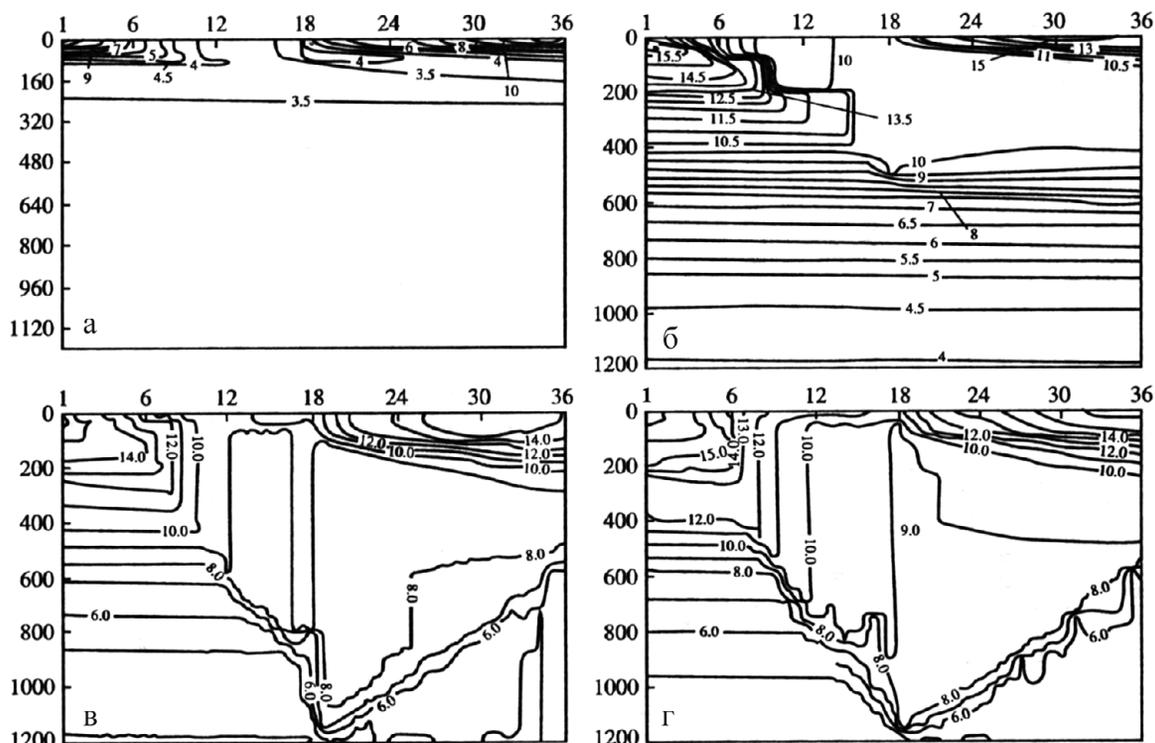


Рис. 3 – Эволюция термической структуры в точках N1 (а) и N4 (б) при граничных условиях $T_{z=0}(t) + \delta T(t), S_{z=0}(t), V_{z=0}(t)$; в точках N4 (в) и N8 (г) при граничных условиях $T_{z=0}(t) + \delta T(t), S_{z=0}(t) + \delta S(t), V_{z=0}(t)$. Горизонтальная шкала – шкала времени: 1 – первая декада сентября, 6 – первая декада ноября и т. д.

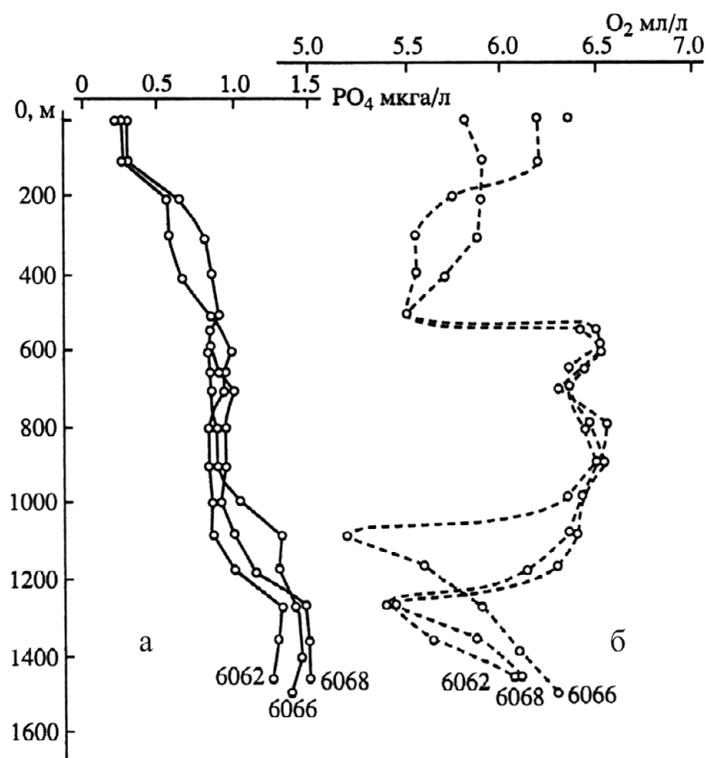


Рис. 4 – Вертикальное распределение фосфатов PO_4 (а) и содержания кислорода O_2 (б) на станциях 6062, 6066 и 6068, расположенных на разрезе через линзу (рисунок 1г)

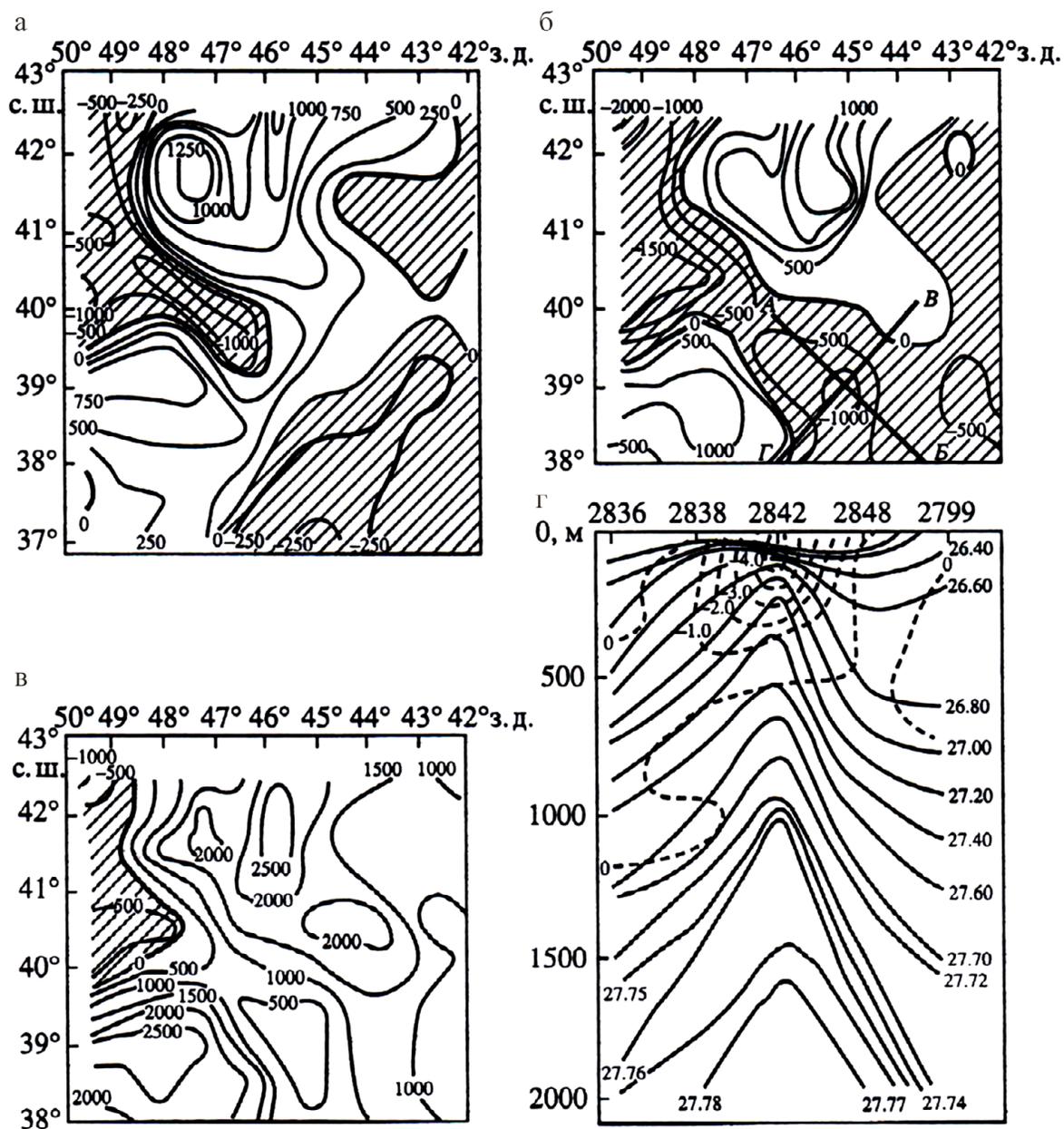


Рис. 5 – Аномалии теплосодержания вод дельты Гольфстрима для слоев 0–500 (а), 0–1000 (б) и 0–2000 м (в) и изопикнические аномалии температуры на нормальном (б, линия АБ) к фронту разреза через ринг (г).

ВГ – параллельный фронту разрез ринга

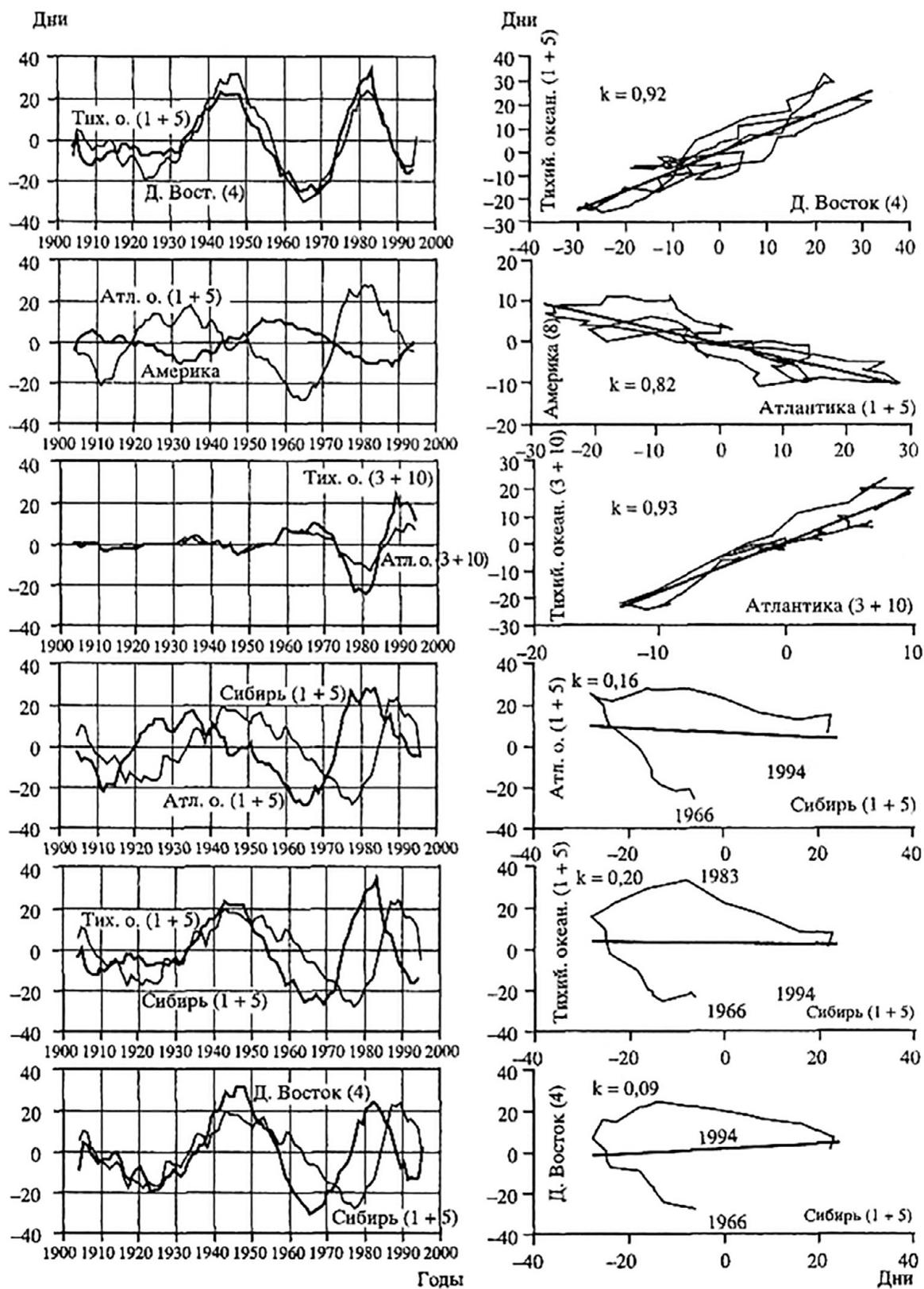


Рис. 6 – Циклические составляющие отдельных пар групп циркуляции (слева) и их амплитудно-фазовые диаграммы (справа); k – коэффициент корреляции для этих пар

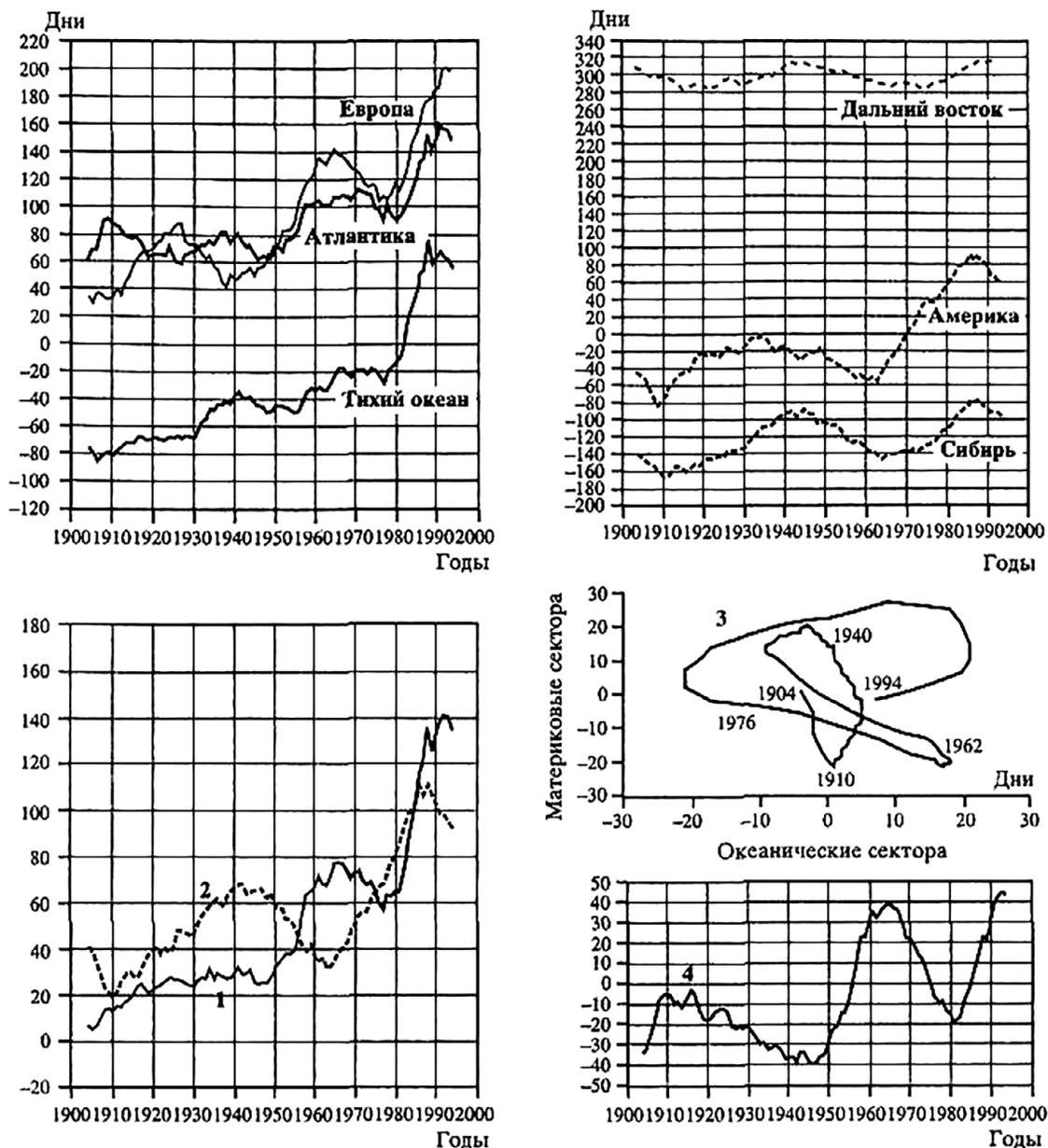


Рис. 7 – Изменение балансов меридиональных южных и северных групп циркуляции для отдельных секторов, групп секторов: 1 – океаны, кривая (2) – материки; амплитудно-фазовые диаграммы их циклических колебаний (3) и разность кривых 1 и 2 (4)

Результаты

Обнаруженная тенденция роста приповерхностной температуры над континентами в XX столетии наблюдалась на фоне снижения температуры над океанами и, напротив, рост ее над океанами – снижением над континентами. Подобное явно указывало на наличие внутрисистемного перераспределения тепла между океаном и континентами, источником которого, очевидно, является Мировой океан. С целью обоснования этой гипотезы были использованы результаты численного

моделирования эволюции термодинамического состояния Мирового океана в период с 1948 по 2007 гг. (Byshhev et al., 2017). Это позволило обнаружить признаки наличия в Мировом океане локальных источников тепла (Бышев, Фигуркин, Анисимов, 2017), которые демонстрируют мультидекадные фазы теплонакопления и тепловой разгрузки (рисунок 8), согласующиеся с фазами относительно влажного и континентального климата.

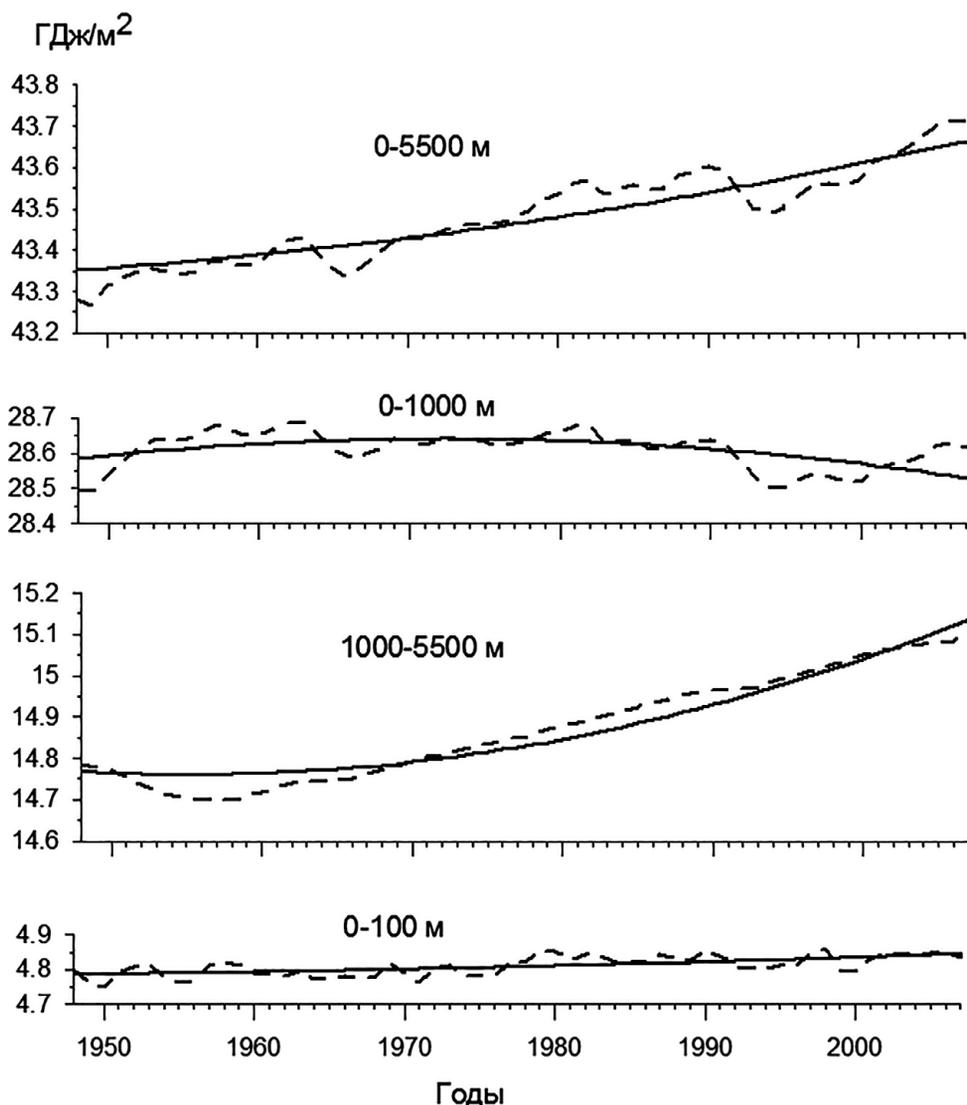


Рис. 8 – Изменчивость теплосодержания Мирового океана в период с 1948 по 2007 год: в слоях 0–5500 м, 0–1000 м, 1000–5500 м, 0–100 м

Фундаментальные процессы, свойственные современной климатической системе, несомненно, должны воспроизводиться высококачественными гидродинамическими моделями в результате численных экспериментов. Естественно, что эти же процессы также должны проявляться при диагностических вычислениях и отражаться в наблюдениях, выполненных в крупных гидрофизических проектах, таких как Полигон-70, ПОЛИМОДЕ, Мегаполигон, Атлантэкс-90 и т. д.

Особенности эволюции теплосодержания МО в период с 1948 по 2007 гг. можно видеть на рисунке 8, на котором представлены изменения теплосодержания как по всей толще вод 0–5500 м, так и в отдельных ее слоях: в верхнем деятельном (0–1000 м), в глубинном (1000–5500 м) и в приповерхностном квазиоднородном (0–100 м) слоях. Теплосодержание МО (0–5500 м) демонстрирует рост, прерываясь в 50–60-е и 80–90-е годы. В верхнем промежуточном слое (100–500 м) МО изменение теплосодержания вод испытывает мультидекадное возмущение относительно некоторого критического уровня, а в приповерхностном (0–100 м) и в глубинном (500–5500 м) слоях оно в течение всего рассматриваемого периода возрастает (Бышев, Гусев, Сидорова, 2022). Наблюдаемая структура эволюции теплосодержания МО свидетельствует о наличии различных режимов и источников подобной изменчивости.

Оценки эволюции теплосодержания в верхнем 1000-метровом слое с более детальным разрешением (по 100-метровым слоям) (Byshev et al., 2022) позволяют выявить некоторые важные детали мультидекадной перестройки вертикальной термической структуры верхнего деятельного слоя Мирового океана (рисунок 8). Теплосодержание приповерхностного 100-метрового слоя в период с 1948 по 2007 гг. демонстрировало тенденцию роста. В нижележащих слоях, по крайней мере, в слое 100–500 м, теплосодержание в указанный период сокращалось. Далее, в слое 500–1000 м, теплосодержание в это же время последовательно перестраивалось с режима определенного сокращения (100–500 м) к признакам его роста (600–700 м). Если приповерхностный 100-метровый слой Мирового океана преимущественно отражает сезонные изменения, хорошо коррелируемые с процессами в пограничном слое атмосферы, то промежуточному слою (100–500 м) в большей степени свойственны процессы, происходящие в главном термоклине, в котором сосредоточены вертикальные и горизонтальные изменения температуры, солености и плотности, а в силу географических соотношений основные изменения по вертикали горизонтальных скоростей течений (Океанология. Физика океана. Т. 1, 1978).

Для анализа пространственно-временной структуры изменений теплосодержания ВДС Мирового океана были рассчитаны и исследованы 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° по широте и 1° по долготе) разрешением, то в каждом узле расчетной сетки для указанных выше фаз климата были рассчитаны ансамбли из более, чем 200 000, вертикальных профилей температуры, осреднения по которым позволяют получить статистически значимые оценки искомых параметров.

В приповерхностном слое (горизонты 0 и 50 м), выделяются районы, где в период с 1975 по 1999 гг. происходило выхолаживание вод Мирового океана (Бышев и др., 2020). 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 (горизонты 200, 250 и 300 м) уже названные районы выхолаживания ВДС значительно возросли по площади, достигнув экстремального развития в центрах северного и южного антициклонических круговоротов Тихого океана. Выхолаживание вод явно проявилось также в каждом из секторов Южного океана. Очаги выхолаживания ВДС в Мировом океане, отмеченные выше на приповерхностных и промежуточных горизонтах, проявляются и на глубинных горизонтах: 600 и 700 м. 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.

Вместе с тем следует отметить, что в период с 1975 по 1999 гг. на значительной акватории Мирового океана ВДС характеризовался и положительными изменениями теплосодержания, в частности это наблюдалось вдоль восточных границ Атлантического и Тихого океанов. Мультидекадные возмущения, таким образом, представляют собой структуру с отрицательными и положительными изменениями теплосодержания ВДС Мирового океана. Очаги отрицательных изменений теплосодержания ВДС, естественно, соответствуют в фазу климата (1975–1999 гг.) источникам океанического тепла, снабжающим атмосферу и способствующим 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, Снопков, 1990; Бышев, Фигуркин, Анисимов, 2016). Положительные изменения теплосодержания ВДС, напротив, свидетельствуют о местоположении районов, в которых в указанный период наблюдается ослабление циклогенеза.

Обсуждение и дискуссия

Изменчивость современного климата характеризуется межгодовыми (2–8 лет) и мультидекадными (20–60 лет) возмущениями. В качестве источника межгодовых возмущений глобального климата принято рассматривать явления Эль-Ниньо – Южные Колебания (Brönnimann, 2007; Серых, 2018). Однако вопрос о природе самого феномена Эль-Ниньо до настоящего времени остается открытым. Для внутридекадных возмущений климата, очевидно, важную роль играет атмосферный фактор. Мультидекадные возмущения (20–60 лет) глобального климата, присутствие которых проявилось эпизодически наблюдаемыми его фазовыми сдвигами (в 1935–1940 гг., в середине 70-х годов прошлого века, на рубеже XX–XXI столетий), реализуются уже при определяющей роли океанического фактора. Надо полагать, что глобальные климатические изменения должны сопровождаться планетарными структурами, как в атмосфере, так и в океане. Следует отметить, что признаки наличия таковых содержатся в многочисленных региональных колебаниях, таких как Северо-Атлантическое, Северо-Тихоокеанское, Арктическое, Южное и др.

Численное моделирование эволюции теплосодержания Мирового океана (рисунок 8) позволило выявить важные особенности этого процесса. В частности, было установлено, что мультидекадная осцилляция теплосодержания океана (МОСТОК) проявляется в слое главного термоклина (100–500 м), в котором расположены структуры всех основных течений Мирового океана: Гольфстрим, Куроисио, Антарктическое Циркумполярное и др. Теплосодержание слоя главного термоклина в 50-е–60-е годы было относительно высоким, а затем в 70-е годы оно начало сокращаться и продолжило сокращение в 80-е и 90-е годы. На рубеже XXI века в слое главного термоклина наметился рост теплосодержания. В верхнем квазиоднородном слое (0–100 м), нижней границей которого является сезонный термоклон, и в глубинном слое (500–5500 м), глубже слоя главного термоклина, в течение всего рассматриваемого интервала времени наблюдался рост теплосодержания. Таким образом, МОСТОК представляет собой внутрислойную структуру, что, вероятно, способствовало долгое время ее сокрытию. Вместе с тем очевидна связь МОСТОК с фазовыми мультидекадными изменениями климата, в которых она выступает в качестве источника наблюдаемых возмущений климата на современном этапе. Можно полагать, что временной масштаб осцилляции определяется временем «зарядки» (теплонакоплением) и «разрядки» (тепловой разгрузки) слоя главного термоклина. Механизмом изъятия тепла из слоя главного термоклина является глубокая конвекция, присутствие или отсутствие которой в информативных районах океана может служить признаком фазового состояния климатической системы.

Характер эволюции теплосодержания вод МО (рисунок 8) позволяет рассматривать ее структуру в качестве суперпозиции различных режимов изменчивости: тренда и волновых колебаний. Положительный тренд характеризует верхний квазиоднородный (0–100 м) и глубинный (1000–5500 м) слой МО (рисунок 8) и представляет собой вековые или более продолжительные изменения, а мультидекадные волновые колебания свойственны промежуточному (100–500 м) слою главного термоклина.

Термический режим МО демонстрирует трехслойность: мультидекадные возмущения теплосодержания в промежуточном слое и его непрерывный рост в верхнем квазиоднородном и в глубинном слоях. 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 в Атлантическом и Тихом океанах вдоль восточных континентальных склонов, 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), в Северной Атлантике, рассматриваемой в качестве одного из 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 различается. В слое главного термоклина имеет место мультидекадная осцилляция 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 главного термоклина МО, несомненно, отражает важную роль последнего в формировании структуры возмущений современного климата. Ранее (Byshev et al., 2017; Бышев, Нейман, Романов, 2016; Cheng et al., 2023) были выявлены мультидекадные ритмы МО и их квазисинхронная связь на соответствующих временных масштабах с изменчивостью планетарной динамики атмосферы (Бышев и др., 2014). Это позволяет обосновать существование процессов глобального внутрисистемного (океан–атмосфера–континент) перераспределения тепла, источником которого выступает теплосодержание слоя главного термоклина 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 Мирового океана 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 и североамериканским континентами (рисунок 7 из (Бышев, Нейман, Романов, 2006)): поверхности океанов оказались аномально прогретыми, а поверхности центральных районов континентов аномально выхолаженными. 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 меридиональных процессов над материками наблюдаются учащения южных меридиональных процессов. Амплитудно-фазовые диаграммы балансов смены южных и северных процессов атмосферной циркуляции над океанами и континентами (рисунки 6–7) (Бышев и др., 2002) указывают на мультидекадную их ритмичность.

Выходы в 1975–1999 гг. холодных арктических воздушных масс на теплые воды, распространяющиеся в высокие широты Атлантики (продолжением Гольфстрима – Северо-Атлантическим течением) и Тихого океана (продолжением Курошио – Северо-Тихоокеанским течением), являются причиной экстремальных потоков тепла

и влаги в атмосфере, развитием аномальной облачности над районами интенсивного теплообмена (Бышев, Снопков, 1990; Бышев, Копрова, Романов, 1993; Бышев, 2003) 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 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 слоя главного термоклина МО в состояние его теплонакопления. Это воспринимается как климатический сдвиг. Далее система находится в режиме восстановления слоев главного термоклина своего начального теплосодержания. Однако, процессы восстановления теплосодержания слоя главного термоклина океана после его тепловой разгрузки занимают значительное время (25–35 лет) и демонстрируют в океане фазовые изменения (Анисимов и др., 2012; Бышев, Фигуркин, Анисимов, 2016), которые можно фиксировать, проводя эпизодически гидрологические наблюдения в его информативных районах. Таким образом, прогноз климатических сдвигов современного климата может быть основан на мониторинге мультидекадного фазового состояния теплосодержания ВДС Мирового океана.

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, природные пожары и пр.).

Главный термоклин Мирового океана, он же его верхний деятельный слой, представляет собой своеобразный системный аккумулятор, тепловая зарядка и разрядка которого сопровождается мультидекадной фазовой изменчивостью современного климата. Углубленному пониманию этого процесса должно способствовать совместное рассмотрение двух крупнейших систем течений Мирового океана – Гольфстрима и Куро시오 с позиции их общности и единообразия термодинамического режима (Kwon et al., 2010). Прежде всего следует отметить, что для этих пограничных систем течений характерно самое значительное взаимодействие океана и атмосферы, выраженное в экстремальных потоках тепла (Wallace, Hobbs, 2006). Во фронтальных зонах в каждой из обеих систем течений существует тесная взаимосвязь пограничного

слоя атмосферы с полем температуры поверхности океана, которая, в свою очередь, воздействует на приповерхностную атмосферу, формируя особенности ее динамики (Small et al., 2008; Joyce et al., 2009; Taguchi et al., 2009).

Мультидекадная осцилляция теплосодержания слоя главного термоклина Мирового океана представляет собой квазисинхронные планетарные изменения в поле температуры воды, которые проявляются на приповерхностных, промежуточных и глубинных 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. 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. Т. 1. 1978). К ним относятся системы течений (Гольфстрим, Куроисио, 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 приэкваториальными и северными районами в Тихом и Атлантическом океанах выявила взаимосвязь термодинамических процессов в двух океанах, выраженную мультидекадным ритмом, временной масштаб которого составил не менее 20–25 лет (Бышев, Нейман, Позднякова, Романов, 2001). 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. 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 согласие наблюдаемой изменчивости полей температуры в регионе Северной Атлантики в климатическую фазу аккумуляции тепла 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, Бышев, Нейман, 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 °С).

Заключение

Открытие структур ГАО и МОСТОК позволило пролить свет на природу Эль-Ниньо (Серых, 2018) и мультидекадную фазовую изменчивость современного климата. Одновременно с этим был достигнут определенный прогресс в перспективе прогноза как Эль-Ниньо, так и мультидекадной изменчивости климата. Стало ясно, что эволюция Эль-Ниньо совершается при активном, а возможно и определяющем, участии атмосферы. В мультидекадных же фазовых возмущениях глобального климата важную роль, несомненно, играет Мировой океан – вариации его термодинамического состояния.

Эволюция теплосодержания МО свидетельствует о наличии двух режимов изменчивости, один из которых отражает процессы ВДС (0–1000 м), а другой –

глубинного слоя (1000–5500 м). Мультидекадные возмущения теплосодержания ВДС океана характеризуют квазисинхронную связь с изменчивостью атмосферы на соответствующих временных масштабах. Это позволяет понять, что наблюдаемые особенности современного климата обусловлены внутрисистемными (океан–атмосфера–континент) процессами перераспределения тепла, источником которого является ВДС МО.

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 различающихся между собой: 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. 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. Планетарные структуры МОСТОК и ГАО позволяют переосмыслить и связать ряд важных экспериментальных результатов, полученных ранее в рамках полигонных исследований и по программе «Разрезы».

Механизм изменчивости современного климата, важной особенностью которого является наблюдаемая его ритмичность, реализуется следующим образом. Выходы арктических воздушных масс, например, 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 океанических 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 в океане мощность слоя, взаимодействующего с атмосферой, а над районом интенсивного теплообмена формируется значительная облачность, сокращающая поток коротковолновой солнечной радиации к поверхности океана, что в результате не компенсирует наблюдаемые потери тепла (эксперименты Мегополигон и Атлантэкс-90). На континентах возникает фаза относительно влажного климата. Многолетний процесс выхолаживания океана, с одной стороны, и увеличение в океане слоя взаимодействия влекут за собой ослабление циклогенеза в атмосфере и как следствие его прерывания, а вместе с тем прерывания 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 очередной тепловой разгрузке.

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за ценные замечания, учет которых способствовал улучшению текста статьи. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН, тема № FMWE-2021-0003.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Анисимов М. В., Иванов Ю. А., Субботина М. М. Глобальный океанский конвейер // Океанология. 2002. Т. 42. № 5. С. 645–649.
4. Бышев В. И. Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы. М.: Наука, 2003. 343 с.
5. 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](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).5).
6. Бышев В. И., Егорихин В. Д., Максименко Н. А., Соболев В. К. Структура и синоптическая изменчивость Северо-Атлантического течения на меридиональном разрезе вдоль 36° з. д. летом 1990 г. // ДАН. 1997. Т. 355. № 3. С. 397–400.
7. Бышев В. И., Копрова Л. И., Навроцкая С. Е., Позднякова Т. Г., Романов Ю. А. Аномальное состояние Ньюфаундлендской энергоактивной зоны в 1990 г. // ДАН. 1993. Т. 331. № 6. С. 735.
8. Бышев В. И., Копрова Л. И., Романов Ю. А. О формировании аномалий ТПО в районе Ньюфаундлендской энергоактивной зоны в мае–июне 1990 г. // Метеорология и гидрология. 1996. № 7. С. 78–87.
9. 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.
10. Бышев В. И., Нейман В. Г., Романов Ю. А. Климатические ритмы теплового режима Мирового океана // Природа. 2016. № 8. С. 26–33.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.

15. 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.
16. Бышев В. И., Орлов В. С. О природе внутритермоклинной линзы на субполярном фронте в Северной Атлантике // *Океанология*. 1993. Т. 33. № 3. С. 340–346.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Бышев В. И., Гусев А. В., Сидорова А. Н. О ключевых факторах короткопериодной изменчивости климатических характеристик океана и атмосферы // *Труды ГОИНа. Исследования океанов и морей*. Москва: Росгидромет, 2022. № 223. С. 180–196. ISSN 0371-7119.
22. 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.
23. 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.
24. Дзердзеевский Б. Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии: Материалы метеорологических исследований. М., 1968. 240 с.
25. 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.
26. Иванов Ю. А., Морозов Е. Г. Перенос вод в дельте Гольфстрима // *Доклады Академии наук СССР*. 1991. Т. 319. № 2. С. 487–490.
27. Календарь последовательной смены ЭЦМ за 87-летний период (с 1899 по 1985 гг.) // *Материалы метеорол. исслед.* 1987. № 13. С. 29–116.
28. Кононова Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Л. Б. Дзердзеевскому. М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
29. *Океанология. Физика океана*. Т. 1.: Гидрофизика океана. М.: Наука, 1978. 455 с.
30. Пономарев В. И., Дмитриева Е. В., Шкорба С. П., Карнаухова 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>.
31. 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 И. М. 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](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).6).
32. Серых И. В. О динамике и структуре Глобальной атмосферной осцилляции в климатических моделях и реальности // *Океанологические исследования*. 2018. Т. 46. № 1. С. 14–28.

33. *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.
34. *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>.
35. *Brönnimann S.* Impact of El Nino Southern Oscillatuon on European climate // *Rev. Geophys.* 2007. Vol. 45. RG3003. <https://doi.org/10.1029/2006RG000199>.
36. *Byshev V. I., Gusev A. V., Neiman V. G., Sidorova A. N.* Interdecadal Oscillation of the Ocean Heat Content as a Contribution to Understanding of Physical Aspects of the Present-Day Climate // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. No. 8. P. 1064. <https://doi.org/10.3390/jmse10081064>.
37. *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>.
38. *Cheng L. J. et al.* Another year of record heat for the oceans // *Adv. Atmos. Sci.* 2023. Vol. 40 (6). P. 963–974. <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>.
39. *De Viron O., Dickey J. O., and Ghil M.* Global modes of climate variability // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40. P. 1832–1837. <https://doi.org/10.1002/grl.50386>.
40. *Feng S., Oglesby R. J., Rowe C. M., Loope D. B., Hu Q.* Atlantic and Pacific SST influences on Medieval drought in North America simulated by the Community Atmospheric Model // *J. Geophys. Res.* 2008. 113. D11101. <https://doi.org/10.1029/2007JD009347>.
41. *Hansen J., Lebedeff S.* Global surface air temperatures: Update through 1987 // *Geophys. Res. Lett.* 1988. No. 15. P. 323–326. <https://doi.org/10.1029/GL015i004p00323>.
42. *Hansen J., Lebedeff S.* Global trends of measured surface air temperatures // *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. 13,345–13,372.
43. *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.
44. *Henley B. J., Gergis J., Karoly D. J., Power S., Kennedy J., Folland C. K.* A Tripole Index for the Interdecadal Pacific Oscillation // *Clim. Dyn.* 2015. Vol. 45. P. 3077–3090. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2525-1>.
45. *Hosler C. L., Gamage L. A.* Cyclone frequencies in the United States for the period 1905–1954 // *Mon. Wea. Rev.* 1956. Vol. 84. P. 388–390.
46. *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. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(2\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).4).
47. *Joyce T. M., Kwon Y.-O., Yu L.* On the Relationship between Synoptic Wintertime Atmospheric Variability and Path Shifts in the Gulf Stream and the Kuroshio Extension // *Journal of Climate*. 2009. Vol. 22. P. 3177–3192. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2690.1>.
48. *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. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0805-9>.
49. *Kwon Y.-O., Alexander M. A., Bond N. A., Frankignoul C., Nakamura H., Qiu B., Thompson L. A.* Role of the Gulf Stream and Kuroshio–Oyashio Systems in Large-Scale. Atmosphere–Ocean Interaction: A Review // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23. P. 3249–3281. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3343.1>.
50. *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 20th Century // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35. L01605. <https://doi.org/10.1029/2007GL032419>.

51. *Levitus S., Antonov J. I., Boyer T. P., Locarnini R. A., Garsia H. E., Mishonov A. V.* Global ocean heat content 1955–2008 in sight of recently revealed instrumentation problems // *Geoph. Res. Letters*. 2009. L.07608. <https://doi.org/10.1029/2008GL037155>.
52. *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. <https://doi.org/10.1007/s11769-017-0841-6>.
53. *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.
54. *Minobe S. A.* Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillation over the North Pacific: role in climatic regime shift // *Geophys. Res. Lett.* 1999. Vol. 26. P. 855–858.
55. *Minobe S. A.* 50–70-Year Climatic Oscillation over the North Pacific and North America // *Geophysical Research Letters*. 1997. Vol. 24. P. 683–686. <http://dx.doi.org/10.1029/97GL00504>.
56. *Nakamura M.* Greenland sea surface temperature change and accompanying changes in the North Hemispheric climate // *Journal of Climate*. 2013. Vol. 26. P. 8576–8596. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00435.1>.
57. *Razjigaeva N., Ganzey L., Gribennikova T., Ponomarev V.* “Cold-Dry” and “Cold-Wet”: Events in the Late Holocene Southern Russia Far East // *Climate*. 2023. Vol. 11. P. 91. <https://doi.org/10.3390/cli11040091>.
58. *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. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/386/1/012006>. <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/386/1>.
59. *Sidorenkov N. S.* Celestial mechanical causes of weather and climate change // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016. Vol. 52 (7). P. 667–682. <https://doi.org/10.1134/S0001433816070094>.
60. *Sidorenkov N. S.* The Interaction Between Earth’s Rotation and Geophysical Processes. Weinheim: Wiley, 2009. 305 p. <https://doi.org/10.1002/9783527627721>.
61. *Small R. J., de Szoeko S. P., Xie S. P., O’Neill L., Seo H., Song Q., Cornillon P., Spall M., Minobe S.* Air–sea interaction over ocean fronts and eddies // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2008. Vol. 45 (3/4). P. 274–319. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2008.01.001>.
62. *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.
63. *Taguchi B., Nakamura H., Nonaka M., Xie S.-P.* Influences of the Kuroshio/Oyashio Extensions on Air–Sea Heat Exchanges and Storm-Track Activity as Revealed in Regional Atmospheric Model Simulations for the 2003/04 Cold Season // *Journal of Climate*. 2009. Vol. 22 (24). P. 6536–6560. <https://doi.org/10.1175/2009jcli2910.1>.
64. *Tsonis A. A., Swanson K., Kravtsov S.* A new dynamical mechanism for major climate shifts // *Geophysical Research Letters*. 2007. Vol. 34. L13705. <https://doi.org/10.1029/2007GL030288>.
65. *Wallace J. M., Hobbs P. V.* *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. 2nd Edition. University of Washington. Academic Press is an imprint of Elsevier. 2006. 483 pp.
66. *Wang G., Swanson K. L., Tsonis A. A.* The pacemaker of major climate shifts // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36. L07708. <https://doi.org/10.1029/2008GL036874>.
67. *Zishka K. M., Smith P. J.* The climatology of cyclones and anticyclones over North America and surrounding ocean environs for January and July, 1950–1977 // *Mon. Weather Rev.* 1980. Vol. 108. P. 387–401.

Статья поступила в редакцию 29.10.2023, одобрена к печати 27.02.2024.

Для цитирования: Бышев В. И., Гусев А. В., Сидорова А. Н. Концептуальные основы альтернативной физической модели современного климата // *Океанологические исследования*. 2024. № 52 (1). С. 5–33. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(1\).1](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).1).

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF AN ALTERNATIVE PHYSICAL MODEL OF MODERN CLIMATE

V. I. Byshev¹, A. V. Gusev^{1,2}, A. N. Sidorova¹

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*

The modern climate is the climate of the current century with its characteristic features. The ocean and the atmosphere, however, are considered as two of the most important components of the climate system. The dynamics and thermodynamics of these spheres reflect the current perturbations of the planetary environment on intra-decadal (2–8 years) and multi-decadal (20–60 years) time scales. Quasisynchrony and globality of the phenomena occurring in the modern climate system are provided and accompanied by planetary scale structures identified both in the atmosphere and in the ocean: respectively, the Global Atmospheric Oscillation (GAO) and the Multi-decadal Oscillation of the Heat content in the Ocean (MOHO).

A characteristic feature of the modern climate dynamics is its observed multidecadal rhythm with a period of about 60 years. The rhythm of 1940–1999 was a two-phase structure, in which the initial phase (1940–1974) was essentially continental, and the final one (1975–1999) was relatively wet. The transition of the climate from the continental phase to the humid phase in the mid-1970s turned out to be “sudden” and was recognized as a climate shift. The search for the source of the observed variability of the modern climate made it possible to establish that the heat content of the active upper layer (AUL) of the World Ocean (WO) demonstrates multi-decadal phases of heat accumulation and heat discharge, consistent with multi-decadal phases of climate disturbances. It should be noted that the heat accumulation phase of the WO AUL corresponds to a continental climate, and its thermal discharge corresponds to a relatively humid one. The mechanism of the observed multidecadal phase variability of the modern climate is the planetary intrasystem redistribution of heat between WO and continents, in which the general circulation of the atmosphere plays the role of a mediator.

Keywords: modern climate, ocean, atmosphere, Global Atmospheric Oscillation (GAO), planetary oceanic oscillation, climate phases

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

References

1. 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.
2. Aleinik, D. I., V. I. Byshev, and V. G. Neiman, 2004: Variability of thermodynamic characteristics in the deep ocean. *Doklady Earth Sciences*, **397** (6), 829–833.
3. Anisimov, M. V., V. I. Byshev, V. B. Zalesniy, and S. N. Moshonkin, 2012: Mul'tidekadnaja izmenchivost' termicheskoy struktury vod Severnoj Atlantiki i ee klimaticheskaja znachimost'

- (Multi-decade variability of the North-Atlantic ocean thermal structure and its climatic significance). *DAN*, **443** (3), 372–376.
4. Anisimov, M. V., Yu. A. Ivanov, and M. M. Subbotina, 2002: Global'nyj okeanskij konvejer (The global oceanic conveyor). *Oceanology*, **42** (5), 645–649.
 5. 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>.
 6. Brönnimann, S., 2007: Impact of El Nino Southern Oscillation on European climate. *Rev. Geophys*, **45**, RG3003, <https://doi.org/10.1029/2006RG000199>.
 7. Byshev, V. I. and I. G. Usychenko, 1995: Temperature structure of Gulf Stream delta waters in May and June 1990. *Doklady Earth Sciences*, **345 A** (9), 133–136.
 8. Byshev, V. I. and V. G. Snopkov, 1990: O formirovanii polya temperatury vody poverhnosti okeana v jenergoaktivnoj zone severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana na primere poligona «MEGAPOLYGON» (On the formation of the ocean surface water temperature field in the energetically active zone of the northwestern part of the Pacific Ocean using the example of the “MEGAPOLYGON” test site). *Meteorologiya i gidrologiya*, **11**, 70–77.
 9. Byshev, V. I. and V. S. Orlov, 1993: O prirode vnutrithermoklinnoj linzy na subpoljarnom fronte v Severnoj Atlantike (On the nature of the intrathermocline lens on the subpolar front in the North Atlantic). *Oceanology*, **33** (3), 340–346.
 10. Byshev, V. I., 2003: *Sinopticheskaja i krupnomasshtabnaja izmenchivost' okeana i atmosfery* (Synoptic and large-scale variability of the ocean and atmosphere). Moscow, Nauka, 343 p.
 11. Byshev, V. I., A. L. Figurkin, and I. M. Anisimov, 2016: Sovremennye klimaticheskie izmenenija termohalinnoj struktury vod SZTO i fluktuacii rybnih soobshhestv (Modern climatic changes in the thermohaline structure of waters of the NWP and fluctuations in fish communities). *Izv. TINRO*, **185**, 215–227.
 12. 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** (1), 1343–1347.
 13. Byshev, V. I., A. V. Gusev, and A. N. Sidorova: 2022: O ključevyh faktorah korotkoperiodnoj izmenchivosti klimaticheskikh harakteristik okeana i atmosfery (On key factors of short-period variability of climatic characteristics). *Trudy GOINa. Issledovaniya okeanov i morej*, **223**, 180–196, Moscow, Rosgidromet, ISSN 0371-7119.
 14. Byshev, V. I., A. V. Gusev, V. G. Neiman, and A. N. Sidorova, 2022: Interdecadal Oscillation of the Ocean Heat Content as a Contribution to Understanding of Physical Aspects of the Present-Day Climate. *Journal of Marine Science and Engineering*, **10** (8), 1064, <https://doi.org/10.3390/jmse10081064>.
 15. Byshev, V. I., L. I. Koprova, and Yu. A. Romanov, 1996: Formation of ocean surface temperature anomalies in the Newfoundland and energy active zone in May–June 1990. *Russian Meteorology and Hydrology*, **1** (7), 57–65.
 16. Byshev, V. I., L. I. Koprova, S. E. Navrockaja, T. G. Pozdnyakova, and Yu. A. Romanov, 1993: Anomal'noe sostojanie N'jufaulndenskoj jenergoaktivnoj zony v 1990 g. (Anomalous state of the Newfoundland energy active zone in 1990). *DAN*, **331** (6), 735–738.
 17. 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](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).5).
 18. Byshev, V. I., N. K. Kononova, V. G. Neiman, and Yu. A. Romanov, 2002: Peculiarities of the climate dynamics in the Northern hemisphere in the 20th century. *Doklady Earth Sciences*, **385** (5), 538–545.
 19. Byshev, V. I., V. D. Egorihin, N. A. Maksimenko, and V. K. Sobol', 1997: Struktura i sinopticheskaja izmenchivost' Severo-Atlanticheskogo techenija na meridional'nom razreze

- vdol' 36° z. d. letom 1990 g. (Structure and synoptic variability of the North Atlantic Current on the meridional section along 36°W in summer 1990). *DAN*, **355** (3), 397–400.
20. 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, <https://doi.org/10.1134/S0001437006020019>.
 21. Byshev, V. I., V. G. Neiman, and Yu. A. Romanov, 2016: Klimaticheskie ritmy teplovogo rezhima Mirovogo okeana (Climatic rhythms of the thermal regime of the World Ocean). *Priroda*, **8**, 26–33.
 22. Byshev, V. I., V. G. Neiman, M. V. Anisimov, A. V. Gusev, 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>.
 23. Byshev, V. I., V. G. Neiman, T. G. Pozdnyakova, and Yu. A. Romanov, 2001: New data on the thermodynamic regime of the climatic system in the Northern hemisphere. *Doklady Earth Sciences*, **381** (A), 1077–1082.
 24. 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, <https://doi.org/10.1134/S1028334X11060304>.
 25. Byshev, V. I., V. G. Neiman, Yu. A. Romanov, and I. V. Serykh, 2009: On the spatial nonuniformity of some parameters of global variations in the recent climate. *Doklady Earth Sciences*, **426** (1), 705–709, <https://doi.org/10.1134/S1028334X09040436>.
 26. Byshev, V. I., V. G. Neiman, Yu. A. Romanov, and I. V. Serykh, 2014: Global'nye atmosferynye oscilljaccii v dinamike sovremennogo klimata (Global atmospheric oscillations in the dynamics of modern climate). *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **11** (1), 62–71.
 27. Byshev, V. I., V. G. Neiman, Yu. A. Romanov, I. V. Serykh, and D. M. Sonechkin, 2016: Statistical significance and climatic role of the global atmospheric oscillation. *Oceanology*, **56** (2), 165–171, <https://doi.org/10.1134/S000143701602003X>.
 28. Cheng, L. J. and al., 2023: Another year of record heat for the oceans. *Adv. Atmos. Sci.*, **40** (6), 963–974, <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>.
 29. De Viron, O., J. O. Dickey, and M. Ghil, 2013: Global modes of climate variability. *Geophysical Research Letters*, **40**, 1832–1837, <https://doi.org/10.1002/grl.50386>.
 30. Diansky, N. A. and V. A. Bagatinsky, 2019: Thermohaline structure of waters in the North Atlantic in different phases of the Atlantic multidecadal oscillation. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **55** (6), 628–639, <https://doi.org/10.1134/S0001433819060021>.
 31. Dzerdzeevskij, B. L., 1968: *Cirkuljacionnye mehanizmy v atmosfere Severnogo polusharija v 20 stoletii: Materialy meteorologicheskikh issledovanij (Circulation mechanisms in the atmosphere of the Northern Hemisphere in the twentieth century: Materials of meteorological research)*. Moscow, 240 p.
 32. Feng, S., R. J. Oglesby, C. M. Rowe, D. B. Loope, and Q. Hu, 2008: Atlantic and Pacific SST influences on Medieval drought in North America simulated by the Community Atmospheric Model. *J. Geophys. Res.*, **113**, D11101, <https://doi.org/10.1029/2007JD009347>.
 33. Gusev, A. V. and N. A. Diansky, 2014: Numerical simulation of the world ocean circulation and its climatic variability for 1948–2007 using INMOM. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **50** (1), 1–12, <https://doi.org/10.1134/S0001433813060078>.
 34. Hansen, J. and S. Lebedeff, 1987: Global trends of measured surface air temperatures. *J. Geophys. Res.*, **92**, 13.345–13.372.
 35. Hansen, J. and S. Lebedeff, 1988: Global surface air temperatures: Update through 1987. *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 323–326, <https://doi.org/10.1029/GL015i004p00323>.
 36. Hayasaka, H., K. Yamazaki, and D. Naito, 2019: Weather conditions and warm air masses during active fire-periods in boreal forests. *Polar Science*, **22**, 100472, 1–7.

37. Henley, B. J., J. Gergis, D. J. Karoly, S. Power, J. Kennedy, and C. K. Folland, 2015: A Tripole Index for the Interdecadal Pacific Oscillation. *Clim. Dyn.*, **45**, 3077–3090, <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2525-1>.
38. Hosler, C. L. and L. A. Gamage, 1956: Cyclone frequencies in the United States for the period 1905–1954. *Mon. Wea. Rev.*, **84**, 388–390.
39. Ivanov, Yu. A. and E. G. Morozov, 1991: Perenos vod v del'te Gol'fstrima (Water transport in the Gulf Stream delta). *Doklady Akademii nauk SSSR*, **319** (2), 487–490.
40. Ivanov, Yu. A., V. I. Byshev, Yu. A. Romanov, and A. N. Sidorova, 2019: On the structure of the North Atlantic Current in May–June 1990. *Journal of Oceanological Research*, **47** (2), 33–63, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(2\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).4).
41. Joyce, T. M., Y.-O. Kwon, and L. Yu, 2009: On the Relationship between Synoptic Wintertime Atmospheric Variability and Path Shifts in the Gulf Stream and the Kuroshio Extension. *Journal of Climate*, **22**, 3177–3192, <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2690.1>.
42. Kalendar' posledovatel'noj smeny JeCM za 87-letnij period (s 1899 po 1985 gg.) (Calendar of successive changes of the ECM over an 87-year period (from 1899 to 1985)). *Materialy meteorol. issled.*, 1987, **13**, 29–116.
43. Kim, H. and S.-I. An, 2013: On the subarctic North Atlantic cooling due to global warming. *Theor. Appl. climatol.*, **114** (1–2), 9–19, <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0805-9>.
44. Kononova, N. K., 2009: *Klassifikacija cirkulacionnyh mehanizmov Severnogo polusharija po L. B. Dzerdzeevskomu* (Classification of circulation mechanisms of the Northern Hemisphere according to L. B. Dzerdzeevsky). Moscow, Voentehinizdat, 372 p.
45. Kwon, Y.-O., M. A. Alexander, N. A. Bond, C. Frankignoul, H. Nakamura, B. Qiu, and L. A. Thompson, 2010: Role of the Gulf Stream and Kuroshio–Oyashio Systems in Large–Scale. Atmosphere–Ocean Interaction: A Review. *Journal of Climate*, **23**, 3249–3281, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3343.1>.
46. 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 20th Century. *Geophysical Research Letters*, **35**, L01605, <https://doi.org/10.1029/2007GL032419>.
47. Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, R. A. Locarnini, H. E. Garsia, and A. V. Mishonov, 2009: Global ocean heat content 1955–2008 in sight of recently revealed instrumentation problems. *Geoph. Res. Letters*, L07608, <https://doi.org/10.1029/2008GL037155>.
48. Mao, K., J. Chen, Z. Li, Y. Ma, Y. Song, X. Tan, and K. Yang, 2017: Global Water Vapor Content Decreases from 2003 to 2012: An Analysis Based on MODIS Data. *Chinese Geographical Science*, **27** (1), 1–7, <https://doi.org/10.1007/s11769-017-0841-6>.
49. 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.
50. Minobe, S. A., 1999: Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillation over the North Pacific: role in climatic regime shift. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 855–858.
51. Minobe, S., 1997: A 50–70-Year Climatic Oscillation over the North Pacific and North America. *Geophysical Research Letters*, **24**, 683–686, <http://dx.doi.org/10.1029/97GL00504>.
52. Nakamura, M., 2013: Greenland sea surface temperature change and accompanying changes in the North Hemispheric climate. *Journal of Climate*, **26**, 8576–8596, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00435.1>.
53. Okeanologiya. Fizika okeana. T. 1.: *Gidrofizika okeana* (Oceanology. Physics of the ocean. V. I. Hydrophysics of the ocean), Moscow, Nauka, 1978, 455 p.
54. Ponomarev, V. I., E. V. Dmitrieva, S. P. Shkorba, and A. A. Karnauhov, 2018: Izmenenie planetarnogo klimaticeskogo rezhima na rubezhe 20–21 vekov (Changes in the planetary climate regime at the turn of the 20th–21st centuries). *Vestnik MGTU*, **21** (1), 160–169, <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-160-169>.

55. Razjigaeva, N., L. Ganzey, T. Gribennikova, and V. Ponomarev, 2023: “Cold-Dry” and “Cold-Wet”. Events in the Late Holocene Southern Russia Far East. *Climate*, **11**, 91, <https://doi.org/10.3390/cli11040091>.
56. 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](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).6).
57. Serykh, I. V., 2018: On the dynamics and structure of the global atmospheric oscillation in climate models and reality. *Journal of Oceanological Research*, **46** (1), 14–28, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46\(1\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(1).2).
58. Serykh, I. V., D. M. Sonechkin, V. I. Byshev, and V. G. Neiman, 2019: Global Atmospheric Oscillation in geopotential fields of the free atmosphere. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **386**, 012006, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/386/1/012006>. <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/386/1>.
59. Sidorenkov, N. S., 2009: *The Interaction Between Earth’s Rotation and Geophysical Processes*. Weinheim: Wiley, 305 p. <https://doi.org/10.1002/9783527627721>.
60. Sidorenkov, N. S., 2016: Celestial mechanical causes of weather and climate change. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, **52** (7), 667–682, <https://doi.org/10.1134/S0001433816070094>.
61. Small, R. J., S. P. de Szoeke, S. P. Xie, L. O’Neill, H. Seo, Q. Song, P. Cornillon, M. Spall, and S. Minobe, 2008: Air–sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **45** (3/4), 274–319, <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2008.01.001>.
62. Stephens, C., S. Levitus, J. Antonov, and T. P. Boyer, 2001: On the Pacific Ocean regime shift. *Geophysical Research Letters*, **28** (19), 3721–3724.
63. Taguchi, B., H. Nakamura, M. Nonaka, and S.-P. Xie, 2009: Influences of the Kuroshio/Oyashio Extensions on Air–Sea Heat Exchanges and Storm-Track Activity as Revealed in Regional Atmospheric Model Simulations for the 2003/04 Cold Season. *Journal of Climate*, **22** (24), 6536–6560, <https://doi.org/10.1175/2009jcli2910.1>.
64. Tsonis, A. A., K. Swanson, and S. Kravtsov, 2007: A new dynamical mechanism for major climate shifts. *Geophysical Research Letters*, **34**, L13705, <https://doi.org/10.1029/2007GL030288>.
65. Wallace, J. M. and P. V. Hobbs, 2006: *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. 2nd Edition, University of Washington, Academic Press is an imprint of Elsevier, 483 p.
66. Wang, G., K. L. Swanson, and A. A. Tsonis, 2009: The pacemaker of major climate shifts. *Geophysical Research Letters*, **36**, L07708, <https://doi.org/10.1029/2008GL036874>.
67. Zishka, K. M. and P. J. Smith, 1980: The climatology of cyclones and anticyclones over North America and surrounding ocean environs for January and July, 1950–1977. *Mon. Weather Rev.*, **108**, 387–401.

Submitted 29.10.2023, accepted 27.02.2024.

For citation: Byshev, V. I., A. V. Gusev, and A. N. Sidorova, 2024: Conceptual foundations of an alternative physical model of modern climate. *Journal of Oceanological Research*, **52** (1), 5–33, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(1\).1](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).1).