

О междекадной изменчивости климатических характеристик океана и атмосферы в регионе Северной Атлантики

М.В. Анисимов¹, В.И. Бышев¹, В.Б. Залесный^{1,2}, С.Н. Мошонкин², В.Г. Нейман¹,
Ю.А. Романов¹, И.В. Серых¹

¹ *Институт океанологии РАН*
117997, Москва, Нахимовский проспект, 36
E-mail: mva@ocean.ru

² *Институт вычислительной математики РАН*
119333, Москва, ул. Губкина, 8
E-mail: atarexm@himki.net

Диагноз изменчивости современного климата, выполненный на основе статистического анализа векового ряда экспериментальных гидрометеорологических данных, показал, что соответствующее множество его фазовых состояний распадается на три подмножества, каждое из которых, отличающееся своими особыми термодинамическими характеристиками, предложено рассматривать в качестве отдельного климатического сценария. Показано, что в регионе Северной Атлантики (СА) на протяжении последнего столетия сменилось три последовательных сценария, относящихся к периодам 1905-1935 гг. (относительно теплая фаза), 1940-1970 гг. (холодная фаза) и 1980-2000 гг. (теплая фаза). По данным нашего анализа и по ряду других независимых признаков можно полагать, что в первой декаде нынешнего столетия начался переход состояния северо-атлантической региональной климатической системы к очередному новому сценарию (относительно холодному!), который, судя по всему, будет продолжаться до 2030-2035 гг. Путем численного моделирования эволюции термохалинной структуры вод СА выявлено, что во второй половине XX столетия в данном регионе имели место междекадные флуктуации теплосодержания верхнего деятельного слоя океана. Этот вывод хорошо коррелируется с изменчивостью сценариев климата в Северном полушарии. Обнаружено, что фаза относительно мягкого, «морского» климата на суше соответствует по времени периоду сокращения запасов океанского тепла, и, напротив, фазе более «континентального» климата сопутствует увеличение теплосодержания верхнего слоя океана.

Ключевые слова: океан, атмосфера, взаимодействие, климат, изменчивость, Северная Атлантика, деятельный слой, атмосферное давление, температура, теплосодержание.

Введение

Изменчивость современного климата – одна из важнейших проблем в науках о Земле. К числу наиболее актуальных исследований в этом направлении относятся работы, посвященные вопросам внутривековых возмущений климата, проявляющихся на межгодовых, междекадных и вековом масштабах [Бышев и др. 2009, 2010; Lee, McPhaden, 2008; Swanson, Tsonis, 2009; Tsonis, et al., 2007; Wang et al., 2009]. Основной целью каждого исследования является установление источников и механизмов наблюдаемых изменений, среди которых называются как естественные, так и антропогенные факторы [IPCC, 2007; Гулев и др., 2008]. В настоящем исследовании наше основное внимание обращено на естественную природу междекадных изменений климата, ведущая роль в которых отводится внутрисистемным колебаниям (автоколебаниям) в системе океан – атмосфера – континент [Бышев и др., 2006, 2009, 2011].

Важность рассматриваемой проблемы становится вполне очевидной, если учесть, что среди заметных внутривековых проявлений этой изменчивости называются: глобальное потепление в последней четверти XX века [Гулев и др., 2008], чередование климатических фаз в регионе СА [Бышев и др., 2011], необычная летняя жара 1972 г. и 2010–2011 гг. в Восточной Европе, колебания уровня Каспийского моря [Lebedev, Kostianoy, 2010], а также многие другие аномальные природные события в различных частях нашей планеты [Akasofu, 2010].

Есть основания полагать, что, несмотря на разномасштабность такого рода возмущений характеристик природной среды, все они могут являться следствием квазициклических вариаций в структуре переноса тепла и влаги из Атлантического региона на Евразийский континент в системе общей циркуляции атмосферы. Исходя из этого предположения, основное наше внимание было направлено на поиск связи конкретной эволюции вертикальной термической структуры верхнего слоя океана с изменчивостью климатических характеристик Североатлантического региона в соответствующем частотном диапазоне. Здесь в первую очередь хотелось бы проследить междекадные (под декадой подразумевается период в 10 лет) изменения в режиме теплообмена океана с атмосферой, которые сопровождаются существенной перестройкой термической структуры верхнего деятельного слоя океана (ВДСО). В этой связи уместно напомнить, что под данным термином понимается приповерхностная часть толщи океанских вод, подверженная непосредственному воздействию атмосферных процессов, и сама, в свою очередь, влияющая на состояние атмосферы посредством турбулентного энерго-массообмена.

Исходя из предположения о том, что наиболее адекватное представление о динамике современного климата можно получить на основе изучения изменчивости параметров климатической системы в ее информативных районах, свое основное внимание мы сосредоточили на эволюции термодинамических условий в областях двух главных центров действия атмосферы в Северной Атлантике – Исландского минимума и Азорского максимума.

Данные наблюдений, методика и материалы исследования

Для диагноза изменчивости современного климата в регионе Северной Атлантики мы воспользовались среднемесячными полями атмосферного давления на уровне моря [Allan, Ansell, 2006] и приповерхностной температуры [Brohan et al., 2005], подготовленными английским центром Met Office Hadley.

При расчетах вертикальной термической структуры и характеристик ВДСО СА была использована хорошо протестированная термогидродинамическая модель циркуляции океана ИВМ РАН, основанная на уравнениях динамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики, записанных в сферической сигма-системе координат [Марчук, 1980; Moshonkin et al., 2011]. Модель имеет пространственное разрешение $(1/4)^\circ$ по долготе и широте и 25 сигма-уровней. На жидких границах на каждом шаге интегрирования задаются значения температуры и солёности, интерполированные по данным из [Steel et al., 2001] с использованием атмосферных характеристик из массива данных CORE [Large, Yeager, 2004]. С помощью рассмотренной модели проведены вычислительные эксперименты по воспроизведению гидрофизических характеристик для периода с января 1958 г. по декабрь 2006 г. По выполненным расчетам определены средние по фазам вертикальные распределения потенциальной температуры $T(\varphi, \lambda, z, t)$, солёности $S(\varphi, \lambda, z, t)$ и потенциальной плотности $\rho(\varphi, \lambda, z, t)$ воды и характеристики ВДСО, причем нижняя граница последнего оценивалась согласно критерию максимума второй производной изменения потенциальной плотности по глубине. Здесь φ – широта, λ – долгота, z – вертикальная координата, отсчитываемая от поверхности моря вверх, t – время.

Фазовая термодинамическая структура центров действия атмосферы и вертикальное распределение температуры вод в Северной Атлантике

Наиболее наглядное представление о короткопериодной изменчивости климата в Северной Атлантике дает фазовая траектория таких термобарических параметров как разности атмосферного давления на уровне моря $\delta\tilde{P}(z_0, t) = \tilde{P}_{A3}(z_0, t) - \tilde{P}_{IC}(z_0, t)$ и приповерхностной температуры $\delta\tilde{T}(z_0, t) = \tilde{T}_{A3}(z_0, t) - \tilde{T}_{IC}(z_0, t)$ между двумя вышеназванными центрами действия

атмосферы (рис.1). Определенная кластерная локализация этих траекторий позволяет обнаружить три сценария климата, которые имели место в течение XX столетия и относились к периодам 1905–1935 гг., 1940–1970 гг. и 1980–2000 гг.

В начале XXI века климатическая система стремительно начала совершать переход в состояние, которое по термобарическим параметрам, по-видимому, ближе всего соответствовало наблюдавшемуся в 40-е – 60-е годы прошлого века [Бышев и др., 2011].

Таким образом, можно определенно говорить о том, что в течение XX столетия в регионе СА сменились три климатических сценария. Во время первого из периодов меридиональные температурные контрасты между рассматриваемыми барическими центрами были минимальными ($18,2^{\circ}\text{C}$), а разность атмосферного давления сохранялась на относительно высоком уровне (12,7 гПа). Приповерхностная температура в этот период в обоих центрах понижалась – океан, очевидно, терял тепло, отдавая его атмосфере. Второй климатический сценарий характеризовался заметным уменьшением разности атмосферного давления (11,2 гПа) при сохранении относительно низких температурных различий ($18,2^{\circ}\text{C}$). Эта фаза климата отличалась повышением приповерхностной температуры в обоих центрах действия, что соответствовало «эпохе» накопления тепла верхним слоем океана. Далее (1980 – 2000 гг.) в регионе обозначился третий климатический сценарий с возросшим температурным контрастом ($18,8^{\circ}\text{C}$) и более высокой разностью атмосферного давления (12,0 гПа) между центрами действия атмосферы [Анисимов и др., 2012; Бышев и др., 2011].

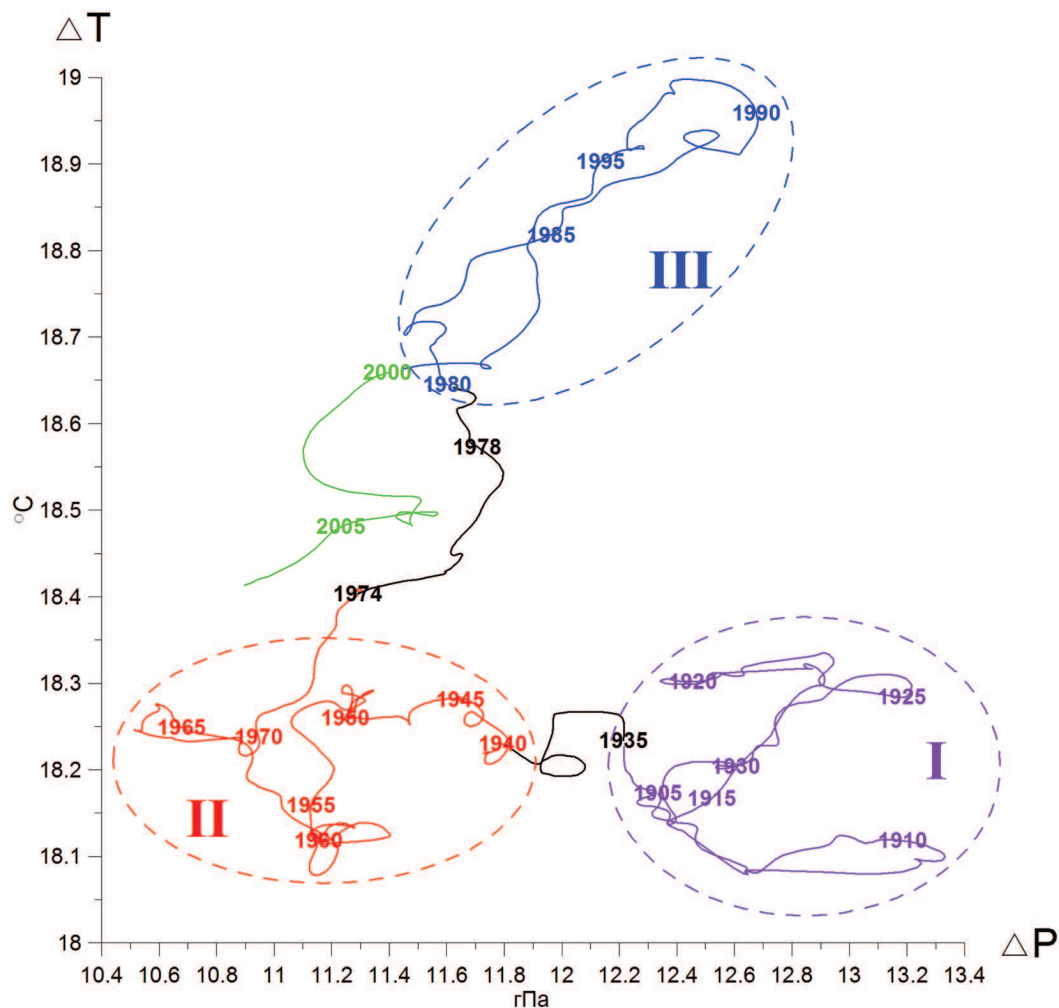


Рис. 1. Фазовая траектория термобарического параметра состояния Северо-Атлантического колебания (разными цветами выделены фазовые подмножества, соответствующие различным сценариям климата): I) 1905–1935, II) 1940–1970, III) 1980–2000

Обнаруженная последовательность чередования климатических сценариев и их гидрометеорологические особенности позволяют представить себе характер термодинамических процессов в региональной системе океан-атмосфера. Первый сценарий, очевидно, характеризовался хорошо развитой зональной циркуляцией атмосферы, значительными потоками явного и скрытого тепла из океана, сокращением теплосодержания его верхнего слоя. Следующий сценарий, переход к которому совершился во второй половине 30-х годов, по всей вероятности, отличался ослаблением зонального переноса в атмосфере и повышением температуры поверхности океана. Третий сценарий обозначился более высокими меридиональными градиентами, как атмосферного давления, так и приповерхностной температуры. Причем в период с 1980 по 1990 г. разности этих характеристик между центрами заметно возрастали, а затем, с 1990 по 2000 г., они снижались.

Интересно было сравнить, насколько эти выводы согласуются с данными других независимых исследований. Однако оказалось, что сделать это не так просто, поскольку результатам предшествующих исследований междекадной изменчивости термодинамических характеристик океана свойственна определенная противоречивость. С одной стороны, в некоторых из них [Levitus et al., 2005, 2009] демонстрируется устойчивый вековой рост теплосодержания вод Мирового океана, в то время как в других, например [Ivchenko et al., 2006; Lyman et al., 2005; Loehle, 2009], указано, скорее, на его циклическую изменчивость. Очевидная ошибочность результатов [Levitus et al., 2005], с чем их авторы позже [Levitus et al., 2009] частично согласились, обусловлена, на наш взгляд, недостаточным разрешением использованных исходных данных, как по времени, так и по пространству.

Рассмотрим теперь некоторые характеристики короткопериодной климатической изменчивости термодинамического состояния верхнего слоя океана. На рис. 2 представлена полученная по модельным расчетам средняя многолетняя (в данном случае за 1975-1999 гг.) топография ВДСО, свидетельствующая о том, что теплообмену СА с атмосферой свойственна значительная пространственная неоднородность.

Областями повышенной теплоотдачи в СА можно назвать по порядку значимости: 1) 500–1000-километровую зону к югу от Гренландии и Исландии (55°–65° с.ш., 40°–20° з.д.); 2) 500–700-километровую зону вдоль южной периферии Северо-Атлантического течения, простирающуюся через весь океан с юго-запада (35° с.ш., 70° з.д.) на северо-восток (45° с.ш., 20° з.д.); 3) район сопряжения двух названных выше областей на востоке океана (40°–60° с.ш., 20°–10° з.д.). Нетрудно убедиться, что эти районы приурочены либо к системам теплых океанских потоков, основным из которых является Северо-Атлантическое течение, либо к полюсам холода, в качестве которого в данном случае надо рассматривать регион Гренландии.

Сопоставление топографии ВДСО, рассчитанной для различных фаз [Бышев и др., 2011] регионального климата (рисунки не приводятся), показало, что в целом эта структура сохраняется в течение всего промежутка времени. Но при этом интегральная нижняя граница этого слоя от одного фазового состояния климата к другому смещается по вертикали на 20–30 метров, т.е. довольно значительно, заглубляясь при интенсификации теплообмена с атмосферой и поднимаясь к поверхности при его ослаблении.

Весьма информативной в климатическом смысле характеристикой термодинамического состояния океана является, как сказано ранее, среднее многолетнее вертикальное распределение температуры воды в деятельном слое

$$\tilde{T}(\varphi, \lambda, z) = \frac{1}{\Delta t_j} \int_{\Delta t_j} T(\varphi, \lambda, z) dt$$

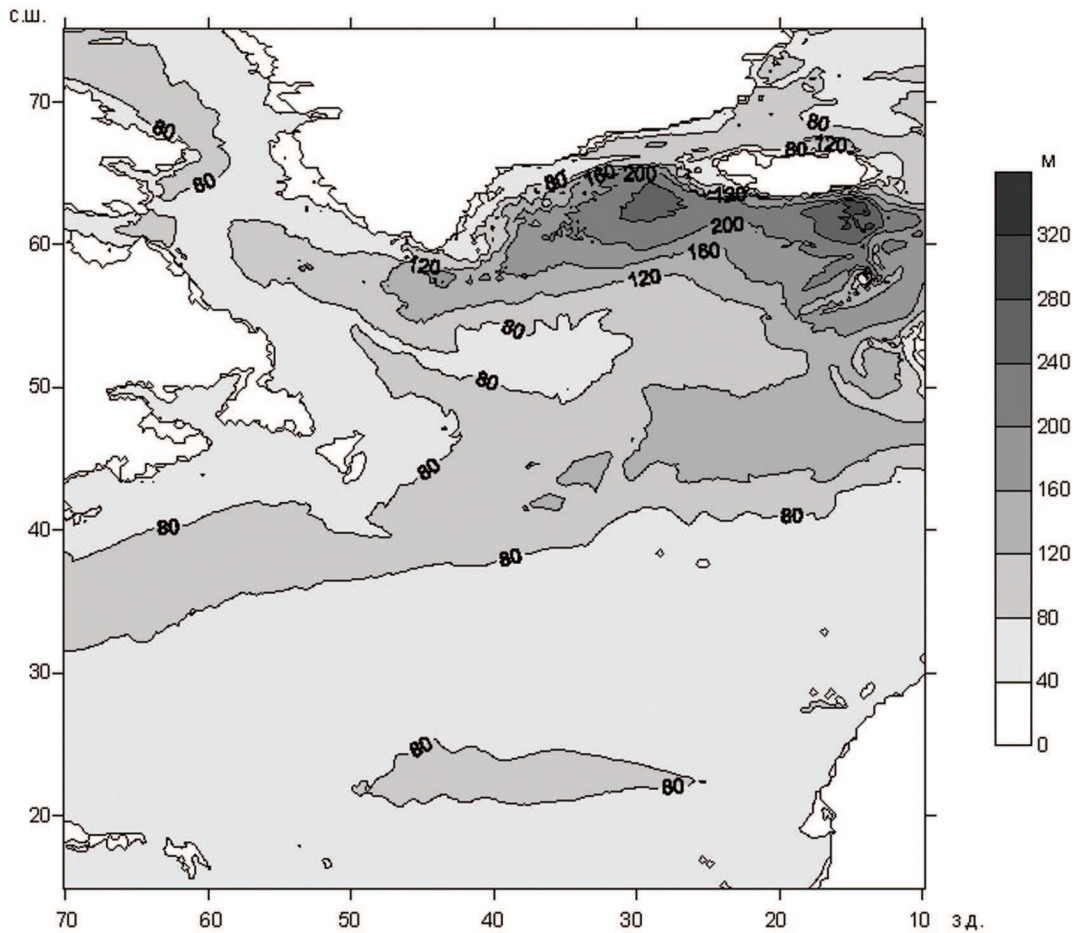


Рис. 2. Средняя многолетняя (1975–1999) глубина деятельного слоя (м) Северной Атлантики

в совокупности со средней температурой приповерхностного слоя $h=500\text{м}$ (рисунок не приводится) $\tilde{T}(\varphi, \lambda, z) = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 T(\varphi, \lambda, t) dz$. Здесь использованы обозначения: Δt_j – протяжен-

ности трех междекадных фаз ($j=1,2,3$). На рис. 3 представлены средние профили температуры воды $\tilde{T}_j(\varphi, \lambda, z)$ в области Исландского минимума атмосферного давления ($55^\circ\text{--}65^\circ\text{с.ш.}$, $40^\circ\text{--}30^\circ\text{з.д.}$), рассчитанные по модели для различных климатических фаз. В период фазы климата 1940–1970 гг. верхнему 1000-метровому слою океана сопутствовали относительно высокое теплосодержание и рост его средней температуры. По всей вероятности, что оба этих фактора своей однозначностью указывают на существование в рассматриваемый период фазы активного накопления тепла океаном и соответствующего сокращения его поступления в атмосферу.

Период сценария климата 1980–2000 гг. характеризовался существенным уменьшением теплосодержания верхнего слоя и понижением его средней температуры. Максимальное заглубление нижней границы деятельного слоя в Исландском регионе ($\sim 1000\text{--}1200\text{ м}$) в этот период следует воспринимать как свидетельство значительного развития вертикального конвективного перемешивания за счет аномального зимнего понижения ТПО. Признаки существования в рассматриваемый период глубокой конвекции были обнаружены и в результатах независимых натуральных наблюдений в эксперименте «АТЛАНТЭКС – 90» [Бышев, 2003]. Судя по всему [Бышев и др., 2011], в эту фазу климата имела место интенсификация потока океанского тепла в атмосферу, а усилившийся западный перенос способствовал выносу влажных и теплых воздушных масс на Евроазиатский континент.

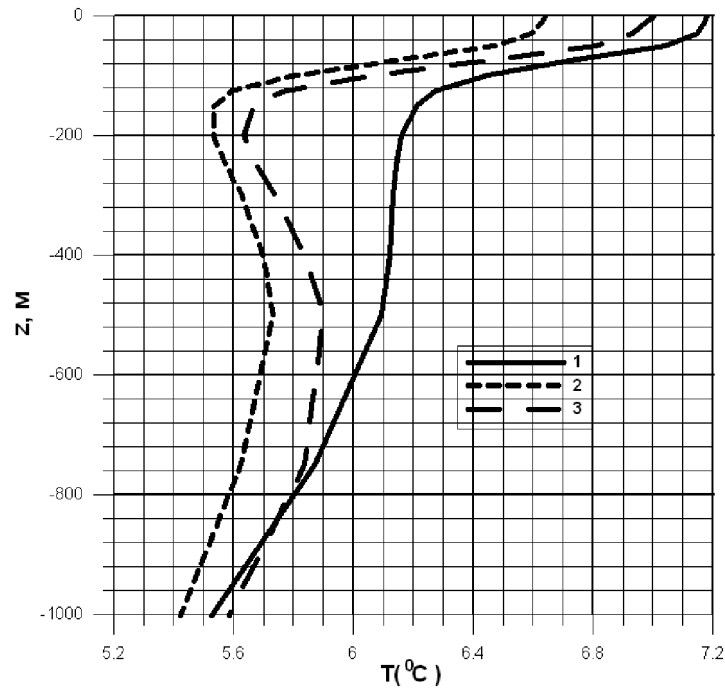


Рис. 3. Средние многолетние вертикальные распределения температуры воды по глубине в районе Исландского минимума атмосферного давления (55-65° с.ш., 40-30° з.д.) по данным численного моделирования за некоторые промежутки времени, относящиеся к различным фазовым состояниям современного климата: (1)- 1940-1970 гг.; (2)- 1980-2000 гг.; (3)-2000-2006 гг.

Результаты выполненного моделирования динамики термической структуры на 2000-2006 гг. $\tilde{T}_j(\varphi, \lambda, z)$ показали (рис. 3), что нижняя граница этого слоя начала заметно приподниматься к поверхности (~800 м), а общее теплосодержание верхнего слоя океана, так же как и средняя температура, стали расти, свидетельствуя об ослаблении механизма глубокой конвекции.

Заключение

Анализ изменения некоторых ключевых климатических параметров региона Северной Атлантики показал, что в рамках примененного в работе пространственно-временного осреднения вековых полей гидрометеорологических характеристик множество полученных оценок термодинамического состояния системы распадается на три кластера, которые могут рассматриваться в качестве отдельных характеристик климатических сценариев. Продолжительность каждого из них составила около 20–35 лет, а переход от одного сценария к другому осуществлялся в течение 2–3 лет, т.е. сравнительно быстро.

Результаты выполненного анализа свидетельствуют о том, что наиболее вероятное перебегающее усиление и ослабление циркуляций Гадлея (низкие широты) и Ферреля (умеренные широты) в данном регионе происходило синфазно.

В начале XX столетия (1905–1935 гг.) и в его последней четверти (1980–2000 гг.) имела место значительная интенсификация этих звеньев общей меридиональной циркуляции. Их ослабление в середине прошлого столетия (1940–1970 гг.) обозначилось и в начале нынешнего века. Одновременно по данным моделирования для этого момента времени отмечено увеличение по сравнению с предшествующим периодом (1980-2000 гг.) теплосодержания поверхностного 200 - метрового слоя. Таким образом, оказалось, что фазы усиления и ослабления меридиональной компоненты атмосферной циркуляции в Северной Атлантике хорошо коррелируют с междекадными вариациями термической структуры деятельного слоя океана.

По совокупности всех этих признаков можно сделать предварительный вывод о начавшемся в первую декаду текущего столетия сокращении потока тепла из океана в атмосферу в Северной Атлантике со всеми вытекающими из этого обстоятельства климатическими последствиями. На основании этого вывода можно полагать, что на рубеже XXI века наряду с сохранением общего положительного тренда средней глобальной приповерхностной температуры наметилась тенденция перехода термодинамического состояния региональной климатической системы Северной Атлантики к новой фазе, по ряду характеристик подобной сценарию 1940–1970-х годов, который сопровождался усилением фактора континентальности климата на материках.

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за ценные замечания, учет которых позволил улучшить содержание работы.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, государственного контракта П1224 от 07.06.2010, проект «Океанический фактор глобальной изменчивости современного климата».

Литература

1. Анисимов М.В., Бышев В.И., Залесный В.Б., Мошонкин С.Н. Междекадная изменчивость термической структуры вод Северной Атлантики и ее климатическая значимость // ДАН. 2012. Т. 443. №3. С. 372–376.
2. Бышев В.И. Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы. М.: Наука, 2003. 344 с.
3. 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.
4. 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.
5. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. Значение и роль Индийского океана в глобальной климатической системе. В кн. «Физические, геологические и биологические исследования океанов и морей». М.: Научный мир. 2010. С. 35–47.
6. 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.
7. Гулев С.К., Катцов В.М., Соломина О.Н. Глобальное потепление продолжается // Вестник РАН. 2008. Т.78. №1. С. 20–27.
8. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука. 1980. 535 с.
9. Akasofu S.I. On the recovery from the Little Ice Age. *Natural Science*. 2010. V. 2. No 11. P. 1211–1224.
10. Allan R.J., Ansell T.J. A new globally-complete monthly historical gridded mean sea level pressure data set (HadSLP2): 1850–2004 // *J. Climate*. 2006. V.19. P. 5816–5846.
11. Brohan, P., Kennedy J.J., Harris I. et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850 // *J. Geophys. Res.* 111, D12106, doi: 10.1029/2005. JD006548.
12. Huybers P., Curry W. Links between annual, Milankovitch and continuum temperature variability // *Nature*. 2006. V. 441. 18 May. Pp. 329–332.
13. Ivchenko V.O., Wells N.C., Aleynik D.L. Anomaly of heat content in the northern Atlantic in the last 7 years: Is the ocean warming or cooling? // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V.33. LXXXIX. doi:10.1029/2006GL027691. 2006.
14. Large W. G., Yager S. G., Diurnal to Decadal Global Forcing for Ocean and Sea-Ice Models: The Data Sets and Flux Climatologies. Climate and Global Dynamics Division. National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado. 2004. 113 pp.
15. Lebedev S.A., Kostianoy A.G. Proc. Intern. Conf. “The Caspian Region: Environmental Consequences of the Climate Change”. Moscow, October 14–16, 2010. Moscow, 2010. P. 263–268.
16. 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 // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35 L01605, doi: 10.1029/2007 GL032419, 2008.
17. Levitus S., Antonov J., Boyer T. Warming of the World ocean. 1995–2002 // *Geophys. Res. Lett.*, 2005. v.32, LO2604, doi: 10.1029/2004GL021592, 2005.

18. *Levitus S, Antonov J.I., Boyer T.P., Locarnini R.A., Garcia H.E., Mishonov A.V.* Global ocean heat content 1955-2008 in light recently revealed instrumentation problems // *Geophys.Res.Lett.*, 36, L07608, doi: 10.1029/2008 GL037155.
19. *Loehle C.* Gooling of the Global ocean since 2003 // *Energy and Environment*. 2009. V. 20. №1-2. P. 99–102.
20. *Lyman J.M., Willis J.K., Johnson G.C.* Recent cooling of the upper ocean.// *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L18604. doi: 10-1029/GL27033. 2005.
21. *Moshonkin S.N., G.V. Alekseev, A.V. Bagno, A.V. Gusev, N.A. Diansky, V.B. Zalesny.* Numerical simulation of the North Atlantic-Arctic Ocean-Bering Sea circulation in the 20th century // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling*. Netherland. 2011. Vol. 26. No. 2. Pp. 161–178.
22. *Steele M., R. Morley, Ermold W.* PHC: A global ocean hydrography with a high-quality Arctic Ocean // *J. Climate*. 2001. Vol. 14, Issue 9, pp. 2079–2087.
23. *Swanson K.L., Tsonis A.A.* Has the climate recently shifted? // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L06711, doi: 10.1029/2008 GL037022, 2009.
24. *Tsonis A.A., Swanson K., Kravtsov S.* A new dynamical mechanism for major climatic shifts // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V.34. L13705, doi: 10.1029/2007 GL030288, 2007.
25. *Wang G., Swanson K.L., Tsonis A.A.* The pacemaker of major climate shifts // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V.36. L07708, doi: 10.1029/2008 GL036874, 2009.

On inter-decadal climate oscillations in the North-Atlantic region

**M.V. Anisimov¹, V.I. Byshev¹, V.B. Zalesny^{1,2}, S.N. Moshonkin²,
V.G. Neiman¹, Ju.A. Romanov¹, I.V. Serykh¹**

¹ *P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS*

E-mail: mva@ocean.ru

117997 Moscow, 36 Nakhimovsky pr.

² *Institute of Numerical Mathematics RAS*

119333 Moskow, 8 Gubkina str.

E-mail: atarexm@himki.net

A diagnosis of the modern climate inter-decadal variability was conducted by means of statistical analysis of a secular term of the Global hydrometeorological data sets. A multitude of the North-Atlantic climate phase states have been found to divide onto three sub-sets with their own particular thermo-dynamic characteristics which allowed considering each of the subset as a feature of the certain climatic scenario. It was shown that during the last century the North-Atlantic region experienced the impact of three such successive scenarios referred to the next periods: 1905–1935 (relatively warm phase), 1940–1970 (cooler phase), 1980–2000 (warmer phase). Our present results combined with some other independent views gives an argument on that in the first decade of current century the North-Atlantic climatic system began its transition to a new scenario (relatively cool!) which, to all appearances, will continue up to 2030-2035. By means of numerical modeling of the North-Atlantic Ocean thermo-haline structure evolution it was revealed the inter-decadal variation of upper active ocean layer heat content which took place in second half of the XX-th century. This result is obviously in the good correlation with the detected climate scenarional variability in the Northern Hemisphere. It was found that a milder “marine” climate on the continent corresponds timely to a period of the ocean heat content shortening and vice versa - a phase of more “continental” climate is accompanied by the rise of ocean upper layer heat content.

Keywords: ocean, atmosphere, interaction, climate, variability, North Atlantic, active layer, atmospheric pressure, temperature, heat content.