

Е.А. Базюра, А.Б. Полонский, В.Ф. Санников

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОХАЛИННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

В рамках четырехблочной модели Северной Атлантики исследовано влияние на режимы термохалинной циркуляции нелинейности уравнений состояния и связи объемного транспорта с разностью плотности между северными и южными боксами, а также дрейфового переноса между ними.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *боксовая модель, Северная Атлантика, термохалинная циркуляция, термохалинная катастрофа.*

Введение. Изучение изменчивости климатической системы и прогнозирование изменений климата является актуальной проблемой, имеющей большое практическое значение. Термохалинная циркуляция (ТХЦ) является важной составляющей климатической системы, регулирующей климатическую изменчивость на масштабах от десятилетий до тысячелетий [1 – 4]. ТХЦ – часть крупномасштабной циркуляции в Мировом океане, обусловленная глобальными меридиональными градиентами плотности, создаваемыми потоками тепла и влаги на поверхности. Скорость формирования глубинных вод в Северной Атлантике (Североатлантических глубинных вод – САГВ) и придонных вод в Южном океане (Антарктических донных вод – АДВ) контролирует интенсивность ТХЦ. Мощность источника САГВ и АДВ составляет 18 ± 5 Св [5] и $4 - 6$ Св [5 – 7] соответственно ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$). АДВ распространяются на север в абиссальной зоне океана, а САГВ на юг в слое 2,5 – 3,5 км. В верхнем бароклинном слое формируется компенсационный перенос, направленный на север. ТХЦ способствует смягчению термических контрастов между экватором и полюсом.

В настоящее время меридиональная термохалинная циркуляция определяется в основном термическим фактором, поскольку перепады температуры между высокими и низкими широтами более значительны, чем перепады солености. Меридиональные градиенты солености уменьшают перепады плотности между низкими и высокими широтами, поскольку вода в высоких широтах менее соленая, чем в тропиках. Однако, градиенты солености недостаточно велики, чтобы уменьшить эти перепады до нуля, а, тем более, изменить их знак [8]. Вышеописанный режим ТХЦ не является единственно возможным. В ряде работ (см., напр. [9 – 11]) установлено существование нескольких различных режимов термохалинной циркуляции в рамках рассмотренных моделей. Между этими режимами возможны резкие переходы вплоть до полного коллапса ТХЦ (так называемая термохалинная катастрофа – ТХК). Результаты палеоклиматических исследований подтверждают реальность ТХК (см., например, [1, 12]). Интерес к исследованию ТХК значительно возрос в связи с проблемой глобального потепления антропогенного происхождения [8]. По мнению авторов

некоторых работ, таяние льдов и другие изменения гидрологического цикла, обусловленные глобальным потеплением, могут вызвать изменение режима ТХЦ уже в обозримом будущем [13, 14]. Поэтому исследование режимов ТХЦ в современных климатических условиях остается актуальным.

В настоящей работе используется модифицированная четырехблочная модель, предложенная в работе [15]. Изучаются эффекты, связанные с учетом таких важных физических механизмов, как нелинейность уравнений состояния и связи между объемным транспортом и меридиональной разностью плотности [16], а также дрейфовым переносом между блоками.

Описание модели. На рис. 1 представлена схема модели.

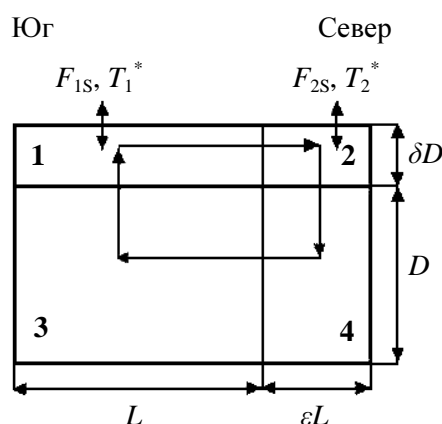


Рис. 1 . Схема боксовой модели Северной Атлантики: 1 – южный поверхностный блок; 2 – северный поверхностный блок; 3 – южный глубинный блок; 4 – северный глубинный блок; β, ε – безразмерные коэффициенты. Стрелками показано положительное направление термohалинной циркуляции (термическая мода).

В южном поверхностном блоке вода относительно теплая и соленая, а в северном – относительно холодная и пресная. Изменения тепла и соли в каждом блоке обусловлены адвективным обменом с соседними блоками и потоками тепла и соли через поверхность в первых двух блоках. Предполагается, что океан получает тепло из атмосферы в первом южном блоке и отдает во втором северном с нулевым интегральным балансом. Кроме того, считается, что осадки, выпадающие над вторым блоком, формируются в результате испарения в первом.

Изменения температуры и солёности в каждом блоке описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$\dot{T}_1 = \frac{U}{\delta V} (T_3 - T_1) + F_{1H}, \quad (1)$$

$$\dot{T}_2 = \frac{U}{\delta \varepsilon V} (T_1 - T_2) + F_{2H}, \quad (2)$$

$$\dot{T}_3 = \frac{\bar{U}}{V} (T_4 - T_3), \quad (3)$$

$$\dot{T}_4 = \frac{U}{\varepsilon V} (T_2 - T_4), \quad (4)$$

$$\dot{S}_1 = \frac{U}{\delta V} (S_3 - S_1) + F_{1S}, \quad (5)$$

$$\dot{S}_2 = \frac{U}{\delta \varepsilon V} (S_1 - S_2) + F_{2S}, \quad (6)$$

$$\dot{S}_3 = \frac{\bar{U}}{V} (S_4 - S_3), \quad (7)$$

$$\dot{S}_4 = \frac{U}{\varepsilon V} (S_2 - S_4), \quad (8)$$

где U – скорость объемного переноса, T_1, T_2, T_3, T_4 , и S_1, S_2, S_3, S_4 , – температуры и солёности боксов, ε и δ – безразмерные геометрические параметры (см. рис. 1), V – объем третьего бокса, $T_1^*, T_2^*, S_1^*, S_2^*$ – эффективные температуры и солёности поверхностных боксов, $\gamma_S^{-1}, \gamma_T^{-1}$ – время релаксации для солёности и температуры.

Потоки тепла на поверхности океана в верхних боксах пропорциональны разности температур воздуха и воды, т.е.

$$F_{iH} = \gamma_T (T_i^* - T_i). \quad (9)$$

Для потоков соли используется смешанное условие:

$$F_{iS} = \gamma_S (S_i^* - S_i), \quad (10)$$

$$F_{iS} = \gamma_S (S_i^* - \bar{S}_i), \quad (11)$$

где \bar{S}_i – стационарное значение солёности боксов. Условие (10) используется при решении стационарной задачи. При решении нестационарной задачи используется условие (11).

Меридиональная циркуляция в боксовой модели обусловлена горизонтальным градиентом давления между севером и югом, который в гидростатическом приближении пропорционален градиенту плотности.

Охлаждение океана (приводящее к увеличению плотности) на севере обуславливает термохалиную циркуляцию в верхнем слое, направленную от первого бокса ко второму. Объемный транспорт определяется следующими способами:

а) линейной зависимостью (как в работе [15]):

$$U = \frac{U_0}{\rho_0} [\delta(\rho_2 - \rho_1) - (\rho_4 - \rho_3)]; \quad (12a)$$

б) нелинейной зависимостью (как в работе [16]):

$$U = U_1 \left[\frac{\delta(\rho_2 - \rho_1) - (\rho_4 - \rho_3)}{\rho_0} \right]^{\frac{1}{3}}; \quad (12b)$$

в) линейной зависимостью с учетом дрейфовой составляющей объемного транспорта между боксами (12е).

Положение северных полярных боксов соответствует области формирования Североатлантической глубинной водной массы. Поэтому, согласно геометрии модели, границы северных боксов можно выбрать так: 10 и 60° з.д., 55 и 65° с.ш. Величина дрейфового переноса на 60° с.ш. составляет около 1 Св [17]. Приняв во внимание рассуждения, изложенные в работе [18], нами было получено уравнение для объемного транспорта с учетом дрейфового переноса между первым и вторым боксами:

$$U = \frac{U_0}{\rho_0} [\delta(\rho_2 - \rho_1) - (\rho_4 - \rho_3)] - K(T_1 - T_2)^2. \quad (12е)$$

Плотность определяется уравнением состояния в линейной (13а) или в нелинейной (13б) форме:

$$\rho_i = \rho_0 [1 - \alpha(T_i - T_0) + \beta(S_i - S_0)], \quad (13а)$$

$$\rho_i = \rho_0 [1 - \alpha(T_i - T_0) + \beta(S_i - S_0) - \alpha_1(T_i - T_0)^2]. \quad (13б)$$

В модели при расчетах использовались следующие параметры: $\alpha = 1,668 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; $\beta = 7,61 \cdot 10^{-4} (\text{‰})^{-1}$; $\alpha_1 = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$ [19]; $\rho_0 = 1027 \text{ кг/м}^3$; $T_0 = 10^\circ\text{C}$; $S_0 = 35\text{‰}$; $U_0 = 8 \cdot 10^{10} \text{ м}^3/\text{с}$; $U_1 = 3 \cdot 10^8 \text{ м}^3/\text{с}$; $V = 8 \cdot 10^{16} \text{ м}^3$; $\varepsilon = \delta = 0,1$; $D = 3000 \text{ м}$, площадь поверхности второго бокса: $A = \varepsilon V/D = 2,67 \cdot 10^{12} \text{ м}^2$, $K = 3,6 \cdot 10^3$, $T_1^* = 25^\circ\text{C}$; $T_2^* = 0^\circ\text{C}$; $S_1^* = 36,5\text{‰}$; $S_2^* = 34,5\text{‰}$, $\gamma_S^{-1} = 300$ суток; $\gamma_T^{-1} = 180$ суток.

Величины T_1^* , T_2^* , S_1^* , S_2^* и γ_T^{-1} , γ_S^{-1} , U_0 , U_1 , K выбраны так, чтобы получить осциллирующий режим и наиболее близкие к реальным (насколько это возможно в данной модели) величины характеристик стационарного состояния.

Стационарные решения. Введем следующие обозначения: \bar{U} – стационарное значение скорости объемного переноса, а \bar{T}_1 , \bar{T}_2 , \bar{T}_3 , \bar{T}_4 и \bar{S}_1 , \bar{S}_2 , \bar{S}_3 , \bar{S}_4 – стационарные значения температуры и солёности боксов. Стационарное решение определяется приравнением нулю правых частей уравнений (1) – (8) при условии, что

$$\bar{T}_2 = \bar{T}_3 = \bar{T}_4 = \bar{T} < \bar{T}_1 = T_1^* + (\varepsilon \cdot T_2^* - \bar{T}),$$

$$\bar{S}_2 = \bar{S}_3 = \bar{S}_4 = \bar{S} < \bar{S}_1 = S_1^* + (\varepsilon \cdot S_2^* - \bar{S}).$$

В линейном случае, когда система (1) – (8) замыкается уравнениями (12а), (13а), получены следующие характеристики стационарного решения: $\bar{T}_1 = 24,4^\circ\text{C}$; $\bar{T} = 6,0^\circ\text{C}$; $\bar{S}_1 = 36,43\text{‰}$; $\bar{S} = 35,18\text{‰}$; $\bar{U} = 16,9 \text{ Св}$.

При использовании нелинейного уравнения состояния (13б), величина объемного транспорта в стационарном состоянии увеличивается на 39%, и составляет $\bar{U} = 23,5 \text{ Св}$. Равновесные TS -характеристики боксов в этом случае таковы: $\bar{T}_1 = 24,2^\circ\text{C}$; $\bar{T} = 7,6^\circ\text{C}$; $\bar{S}_1 = 36,41\text{‰}$; $\bar{S} = 35,32\text{‰}$. Отметим,

что учет нелинейности в уравнении состояния существенно влияет на температуру северного и глубинного боксов, увеличивая ее на 27%.

В эксперименте с линейным уравнением состояния (13а), нелинейной зависимостью объемного транспорта от разности плотностей между северными и южными боксами (12б) для получения реалистичного значения \bar{U} коэффициент связи в (12б) был выбран на два порядка меньше, чем в линейном случае ($U_I = 3 \cdot 10^8 \text{ м}^3/\text{с}$). Стационарное решение имеет вид: $\bar{T}_1 = 24,4^\circ\text{C}$; $\bar{T} = 6,3^\circ\text{C}$; $\bar{S}_1 = 36,43\%$; $\bar{S} = 35,21\%$, $\bar{U} = 17,8 \text{ Св}$. Таким образом, нелинейность в уравнении для объемного транспорта незначительно (не более чем на 6%) изменяет равновесные характеристики боксов и средний объемный транспорт.

При замыкании системы (1) – (8) уравнениями (12б) и (13б) получено следующее стационарное решение: $\bar{T}_1 = 24,3^\circ\text{C}$; $\bar{T} = 6,8^\circ\text{C}$; $\bar{S}_1 = 36,42\%$; $\bar{S} = 35,26\%$; $\bar{U} = 20,1 \text{ Св}$. Объемный транспорт увеличивается на 15%, а равновесная температура северного и глубинных боксов \bar{T} на 13% по сравнению с линейным случаем (когда система (1) – (8) замыкается уравнениями (12а) и (13а)).

Учет дрейфового транспорта между первым и вторым боксами также незначительно изменяет TS -характеристики стационарного решения (не более чем на 3%: $\bar{T}_1 = 24,4^\circ\text{C}$; $\bar{T} = 5,8^\circ\text{C}$; $\bar{S}_1 = 36,43\%$; $\bar{S} = 35,16\%$). Они получены при использовании уравнения (12б) для объемного транспорта и линейного уравнения состояния (13а). Выбор значения параметра $K = 3,6 \cdot 10^3$ в (12б) связан с получением реалистичных значений объемного транспорта \bar{U} и его дрейфовой составляющей $\bar{U}_{др}$. Суммарный объемный транспорт составляет $\bar{U} = 15,88 \text{ Св}$, а его дрейфовая компонента – $\bar{U}_{др} = 1,25 \text{ Св}$. Отметим, что из всех вышеописанных экспериментов, в этом случае выявлено наименьшее расхождение модельных потоков тепла и соли с климатическими. Климатические потоки соли были рассчитаны по массиву данных осадки-испарения ($P-E$) [20], а потоки тепла – по среднемесячным данным реанализа *NCEP (National Center for Environmental Prediction – США)* за период с 1950 по 2001 гг. [21].

Нестационарные решения. Нестационарная задача решалась при переменных потоках тепла (9) и фиксированных потоках соли (11). Для численной реализации уравнений боксовой модели использовалась схема Рунге-Кутты с шагом по времени 1 день.

Для линейного случая проведен тестовый эксперимент, подтверждающий правильность работы модели. На систему, находящуюся в стационарном состоянии накладывались мгновенные возмущения (по температуре и по солености). Одновременно температура южного поверхностного бокса увеличивалась на 5 градусов, а температура северного поверхностного бокса уменьшалась на 5 градусов. Полученные результаты представлены на рис. 2, они согласуются с результатами [15]. Отметим, что такие резкие изменения температуры невозможны при современном состоянии климатической системы.

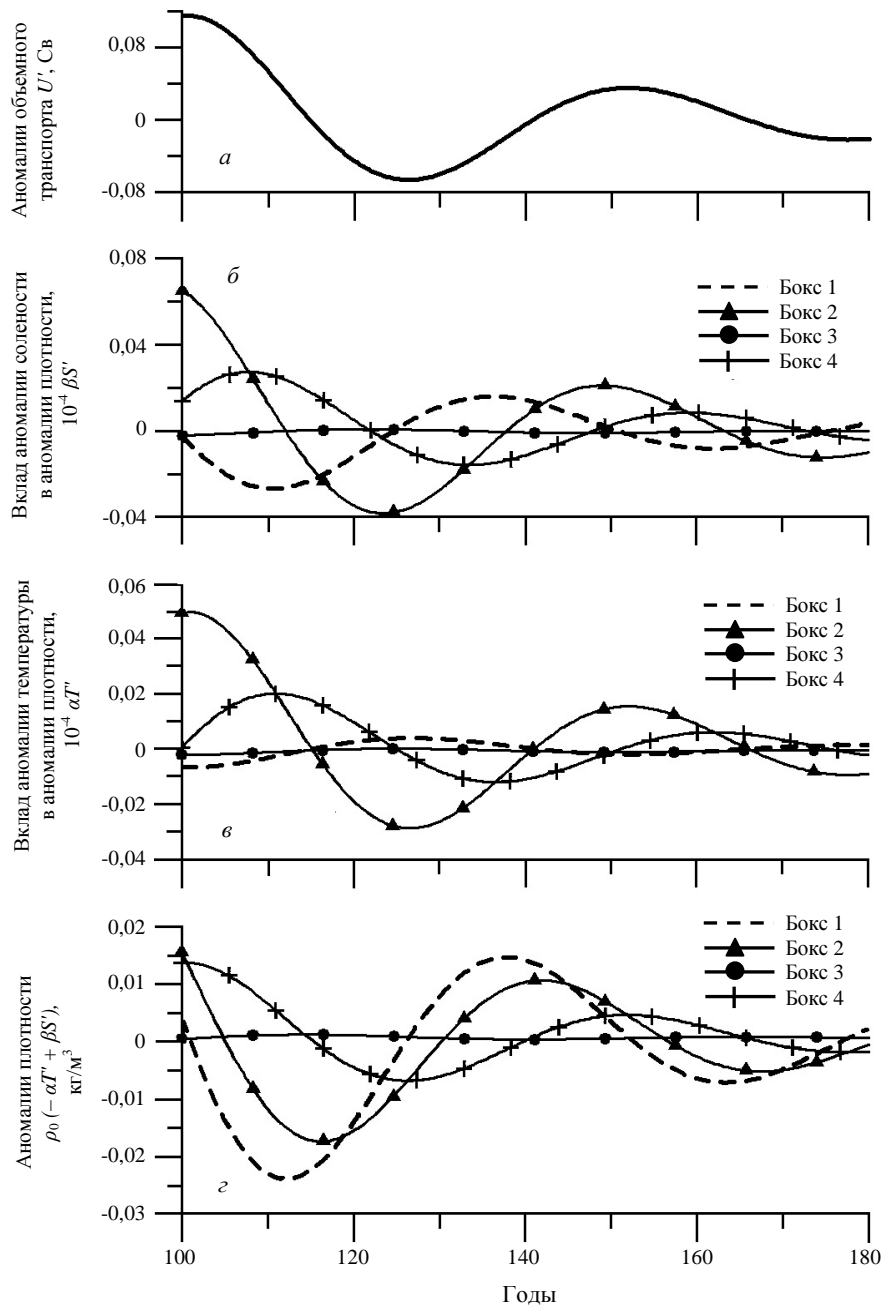


Рис. 2. Временные ряды: *a* – аномалий объемного транспорта U' ; *б* – вклада аномалий солёности $\beta S'$ в аномалии плотности; *в* – вклад аномалий температуры в аномалии плотности $\alpha T'$; *г* – аномалий плотности $\rho_0 (-\alpha T' + \beta S')$ при увеличении температуры первого бокса на 5°C и уменьшении температуры второго бокса на 5°C .

Учет стохастического характера потоков тепла. Атмосфера характеризуется высокочастотными флуктуациями, спектр которых близок к белому шуму. Океан, согласно идее Хассельмана [22], интегрирует атмосферные воздействия. При этом океанический отклик представляет собой относительно пассивную реакцию на атмосферные воздействия. Он имеет вид красного шума, т.е. спектра с концентрацией большей части энергии в области низких частот. В работе [15] учет стохастического характера потоков тепла проводился следующим образом:

$$\dot{T}_1 = \frac{U}{\delta V} (T_3 - T_1) + \gamma_T (T_1^* - T_1) + k \gamma_T \psi_1 (T_1^* - T_1), \quad (14)$$

$$\dot{T}_2 = \frac{U}{\delta \epsilon V} (T_1 - T_2) + \gamma_T (T_2^* - T_2) + k \gamma_T \psi_2 (T_2^* - T_2), \quad (15)$$

где, ψ_1, ψ_2 – случайные величины, распределенные по нормальному закону, $k = 0,09$ – величина коэффициента вариации по температуре (отношения среднеквадратичного отклонения температуры к ее среднему значению).

В [15] получены квазипериодические колебания объемного транспорта. Результаты эксперимента, аналогичного проведенному в [15], представлены на рис. 3.

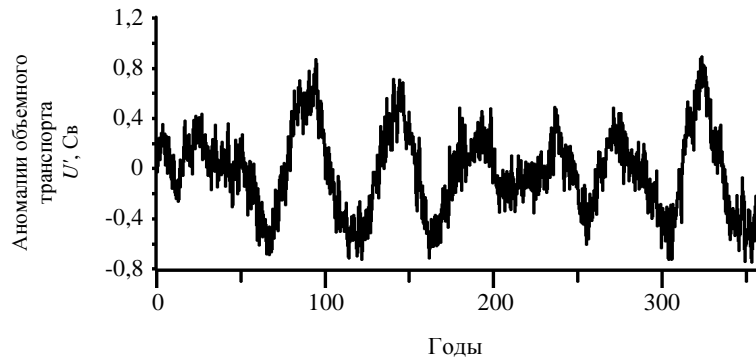


Рис. 3. Временная изменчивость объемного транспорта при учете стохастического характера потоков тепла в виде (14) – (15), полученная в эксперименте, аналогичном эксперименту, проведенному в [15] при $k = 0,09$.

Рассмотрим ситуацию, когда учитывается только стохастический характер эффективной температуры:

$$\dot{T}_1 = \frac{U}{\delta V} (T_3 - T_1) + \gamma_T (T_1^* - T_1) + k_1 \gamma_T T_1^* \psi_1, \quad (16)$$

$$\dot{T}_2 = \frac{U}{\delta \epsilon V} (T_1 - T_2) + \gamma_T (T_2^* - T_2) + k_2 \gamma_T T_2^* \psi_2. \quad (17)$$

Выбраны следующие величины коэффициентов: $k_1 = 0,18$; $k_2 = 0,37$. Они соответствуют коэффициентам вариации климатической поверхностной температуры, оценки которых получены по массиву данных температуры океана [23].

Полученная для этого случая изменчивость объемного транспорта представлена на рис. 4. В этом эксперименте возникают осцилляции с периодом около 80 лет.

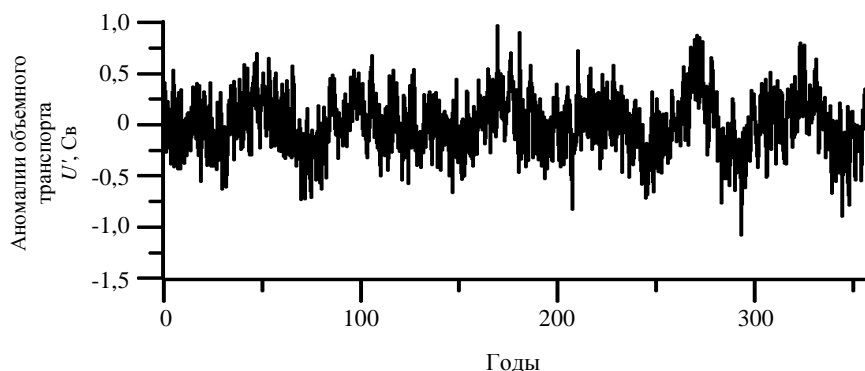


Рис. 4. Временная изменчивость объемного транспорта при учете стохастического характера эффективной температуры в виде (16) – (17), при $k_1 = 0,18$ и $k_2 = 0,37$.

Нелинейное уравнение состояния, линейная зависимость объемного транспорта от разности плотностей между северными и южными боксами. Здесь и далее нестационарная задача решается также, как в эксперименте при линейном уравнении состояния, линейной связи между объемным транспортом и разностью плотностей между северными и южными боксами. При возмущениях температуры и солёности поверхностных боксов, не превышающих критические, получены экспоненциально затухающие колебания. Период колебаний, как это видно из графиков, приведенных на рис. 5, уменьшается на 14% по сравнению с линейным случаем. Это связано с увеличением скорости объемного переноса за счет явления уплотнения при смешении. Время затухания колебаний уменьшается примерно в 3 раза.

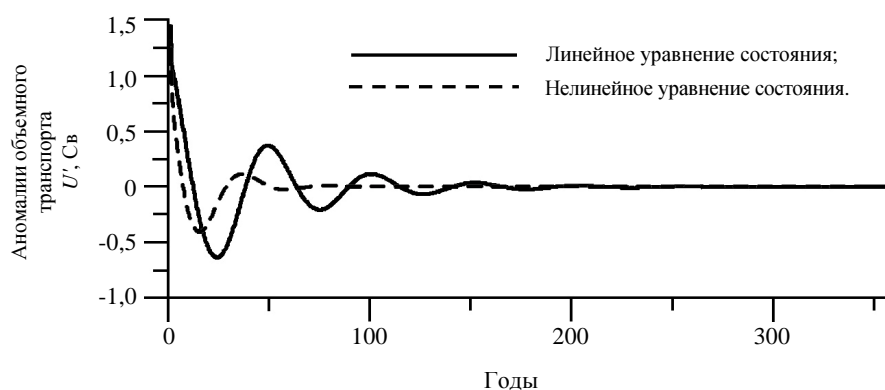


Рис. 5. Временные ряды аномалий объемного транспорта, полученные при одинаковых возмущениях по температуре в первом и втором боксах для линейного (сплошная линия) и нелинейного (пунктир) уравнения состояния.

Линейное уравнение состояния, нелинейная зависимость объемного транспорта от разности плотностей между северными и южными боксами. Результат решения нестационарной задачи представлен на рис. 6.

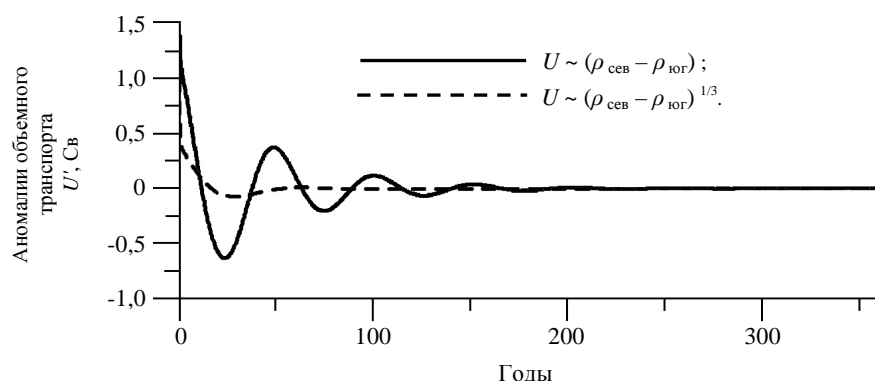


Рис. 6. Временные ряды аномалий объемного транспорта, полученные при одинаковых возмущениях по температуре в первом и втором боксах для линейного и нелинейного уравнения связи между объемным транспортом и разностью плотностей между северными и южными боксами.

Также получены экспоненциально затухающие колебания. Период колебаний увеличивается в 1,4 раза по сравнению с линейным случаем. Это связано с различными коэффициентами связи между объемным транспортом и разностью плотностей между северными и южными боксами. Время затухания колебаний уменьшается в 1,5 раза по сравнению с линейным случаем.

Нелинейное уравнение состояния, нелинейная зависимость объемного транспорта от разности плотностей между северными и южными боксами. На рис. 7 представлен результат решения нестационарной задачи. Отметим, что в этом эксперименте наблюдается наиболее быстрое затухание колебаний из всех исследуемых случаев.

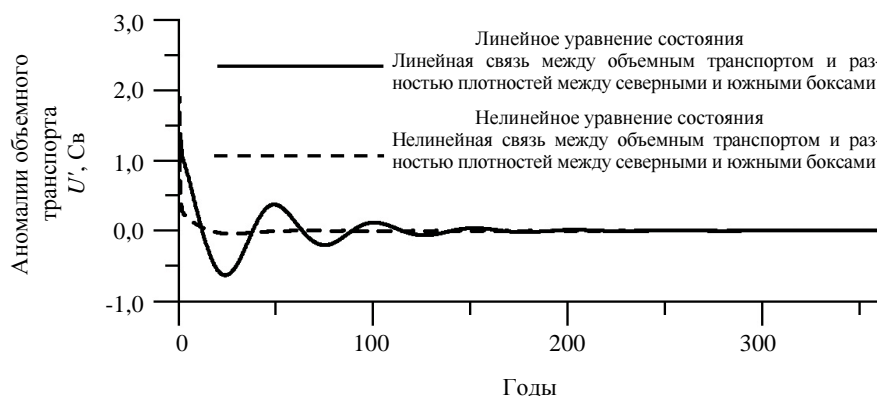


Рис. 7. Временные ряды аномалий объемного транспорта, полученные при одинаковых возмущениях по температуре в первом и втором боксах для линейного и нелинейного уравнения состояния и уравнения связи между объемным транспортом и разностью плотностей между северными и южными боксами.

Учет дрейфовой составляющей объемного транспорта между боксами. Решение нестационарной задачи в этом эксперименте сходно с решением для случая без учета дрейфовой компоненты. Его результаты показаны на рис. 8. Получено незначительное уменьшение времени затухания колебаний и

увеличение периода колебаний. Очевидно, что причиной увеличения периода колебаний является замедление скорости ТХЦ в боксовой модели.

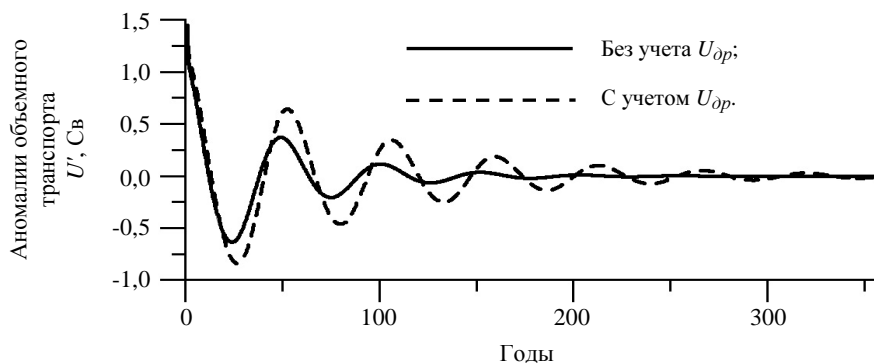


Рис. 8. Временные ряды аномалий объемного переноса. Использованы одинаковые возмущения по температуре в первом и втором боксах, линейное уравнение состояния и линейное уравнение связи между объемным транспортом и разностью плотностей между северными и южными боксами.

Пороговые значения возмущений. Выявим пороговые значения возмущений, при которых происходит смена режима ТХЦ. Отметим основные тенденции изменения климата в областях Атлантического океана, соответствующих боксам.

Для северного поверхностного бокса характерно:

- таяние Гренландского ледового щита со скоростями, по различным оценкам составляющими $6 \cdot 10^{10} - 23 \cdot 10^{10} \text{ м}^3/\text{год}$ [24];
- отрицательный тренд потоков пресной воды (P-E), величина которого по различным оценкам варьирует от -0,01 до -0,5 мм/(день·10лет) за период (1988 – 2001 гг.) [25];
- положительный тренд суммарных потоков тепла (H+LE): $0,02 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ [26].

Южный поверхностный бокс характеризуется:

- положительным трендом потоков пресной воды (P-E), меньшим, чем $0,2 \text{ мм}/(\text{день} \cdot 10 \text{ лет})$ [25];
- отрицательным трендом суммарных потоков тепла (H+LE): $-0,06 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ [26].

Численные эксперименты показали, что режим ТХЦ могут изменить возмущения и температуры, и солёности. При использовании линейных уравнений (12а) и (13а) для этого требуется изменение перепада температур поверхностных боксов более, чем на 35°C , или уменьшение солёности второго бокса на $0,85\%$ – результаты расчетов показаны на рис. 9. Последнее соответствует мгновенному добавлению льда в бокс в объеме $V = 1,9 \cdot 10^{13} \text{ м}^3$.

Большие изменения температуры, необходимые для смены режима ТХЦ, обусловлены тем, что в модели используются переменные потоки тепла на поверхности и температурные возмущения демпфируются теплообменом с атмосферой. Очевидно, что реализация таких пороговых возмущений при современном состоянии климатической системы невозможна.

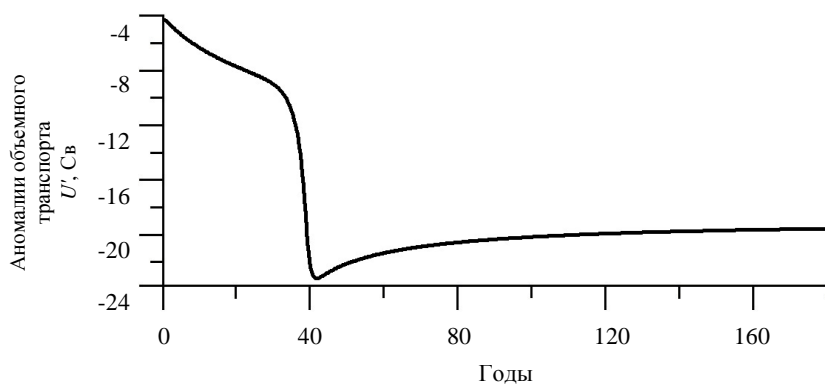


Рис. 9. Временные ряды аномалий объемного транспорта, соответствующие ситуации мгновенного уменьшения солёности во втором боксе на $0,85\text{‰}$.

В случае нелинейного уравнения состояния и линейной зависимости объемного транспорта от разности плотностей между северными и южными боксами величина порогового возмущения увеличивается примерно в 2 раза: переход ТХЦ в режим с величиной объемного транспорта, отличной от наблюдающейся в современной климатической ситуации (ТХК), происходит при уменьшении солёности бокса 2 на $1,69\text{‰}$.

В случае линейного уравнения состояния и нелинейной зависимости объемного транспорта от разности плотностей между северными и южными боксами критическая величина, на которую надо уменьшить солёность во втором боксе для перехода ТХЦ в режим составляет $2,2\text{‰}$. Это превышает критическое значение для линейного случая в 2,6 раза.

При нелинейном уравнении состояния, нелинейной зависимости объемного транспорта от разности плотностей между северными и южными боксами величина, на которую необходимо опреснить второй бокс увеличивается почти в 4 раза и составляет $3,3\text{‰}$. Таким образом, нелинейные эффекты стабилизируют систему.

При учете дрейфовой составляющей объемного транспорта между боксами переход ТХЦ в другой режим происходит при уменьшении солёности второго бокса на $0,62\text{‰}$. Эта величина меньше, чем в эксперименте без учета $\bar{U}_{др}$ и соответствует добавлению льда в объеме $1,4 \cdot 10^{13} \text{ м}^3$, что на три порядка превышает скорость таяния льдов в Северном полушарии [24]. Следовательно, учет дрейфового переноса между первым и вторым боксами приводит к уменьшению стабильности системы. Это, вероятно, связано с уменьшением скорости объемного транспорта.

Выводы.

1. В рамках четырехбоксовой модели ТХЦ показано, что в современной климатической ситуации маловероятно развитие термохалинной катастрофы. Роль нелинейных эффектов проявляется в дополнительной стабилизации системы. В частности, учет нелинейности уравнения состояния приводит к увеличению объемного транспорта в стационарном состоянии, уменьшению времени затухания колебаний и уменьшению периода осцилляций.

2. Стохастический характер потоков тепла в боксовой модели обуславливает возникновение квазидесятилетних осцилляций объемного транспорта с амплитудами порядка 1 Св.

3. Учет дрейфового переноса между северными и южными боксами приводит к увеличению периода колебаний системы, и к незначительному уменьшению стабильности системы.

Авторы статьи выражают благодарность Юровскому А.В. за предоставленные данные по внешнему тепловому балансу океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clark P.U., Pisias N.G., Stocker T.F. and Weaver A.J. The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change // *Nature*. – 2002. – vol. 415. – P. 863-869.
2. Rahmstorf S. Decadal variability of the thermohaline ocean circulation / *Beyond El Nino: Decadal and interdecadal climate variability* (Ed. Navarra A.). – Berlin.: Springer. – 1999. – P. 309-332.
3. Stocker T.F. Past and future reorganizations in the climate system // *Quaternary Science Reviews*. – 2000. – vol. 19. – P. 301-319.
4. Broecker W.S. Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: Will manmade CO₂ upset the current balance? // *Science*. – 1997. – vol. 278. – P. 1582-1588.
5. Talley L. D., Reid J. L. and Robbins P.E. Data-based meridional overturning streamfunctions for the global ocean // *Journal of Climate*. – 2003. – vol. 16. – P. 3213-3226.
6. Broecker W.S., Peacock S.L., Walker S., Weiss R., Fahrbach E., Schroeder M., Mikolajewicz U., Heinze C., Key R., Peng T.-H., Rubin S. How much deep water is formed in the Southern Ocean // *Journal of Geophysical Research*. – 1998. – vol. 103. – P. 15833-15843.
7. Jacobs S.S. Bottom water production and its links with the thermohaline circulation // *Antarctic Science*. – 2004. – vol. 16, № 4. – P. 427-437.
8. Полонский А.Б. Глобальное потепление, крупномасштабные процессы в системе океан-атмосфера, термохалинная катастрофа и влияние на климат Атлантико-Европейского региона. – Севастополь.: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – 45 с.
9. Stommel H. Thermohaline convection with two stable regimes of flow // *Tellus*. – 1961. – vol. 13. – P. 224-230.
10. Rooth C. Hydrology and ocean circulation // *Progress in Oceanography*. – 1982. – vol. 11. – P. 131-149.
11. Marotzke J. Abrupt climate change and thermohaline circulation: Mechanisms and predictability // *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*. – 2000. – vol. 97. – P. 1347-1350.
12. Lynch-Stieglitz J. et al. Atlantic Meridional Overturning circulation during the Last Glacial Maximum // *Science*. – 2007. – vol. 316. – № 5821. – P. 66-69.
13. Dixon K.W., Delworth T.L., Spelman M.J. and Stouffer R.J. The influence of transient surface fluxes on North Atlantic overturning in a coupled GCM climate change experiment // *Geophysical Research Letters*. – 1999. – vol. 26. – P. 2749-2752.
14. Mikolajewicz U. and Voss R. The role of the individual air-sea flux components in CO₂-induced changes of the ocean's circulation and climate // *Climate Dynamics*. – 2000. – vol. 16. – P. 627-642.
15. Griffies S.M., Tziperman E. A linear thermohaline oscillator driven by stochastic atmospheric forcing // *Journal of Climate*. – 1995. – vol. 8. – P. 2440-2453.
16. Park Y-G. The Stability of Thermohaline Circulation in a Two-Box Model // *Journal of Physical Oceanography*. – 1999. – vol. 29. – P. 3101-3110.

17. *Беседин Д.Е., Шаповалов С.М.* Дрейфовый перенос через 60° с.ш. в Северной Атлантике /Фундаментальные исследования океанов и морей. Том 1 (гл. ред. Лаверов). – М.: Наука, 2006. – 307 с.
18. *Полонский А.Б.* О механизме десятилетних колебаний в системе океан-атмосфера // Морской гидрофизический журнал. – 2002. – № 1. – С. 25-34.
19. *Bryan K., Cox M. D.* An approximate equation of state for the study of the circulation of the World ocean // Journal of Physical Oceanography. – 1972. – vol. 2. – P. 319-335.
20. *Da Silva A.M., Young-Molling C.C. and Levitus S.* Atlas of Surface Marine Data 1994. Vol. 4: Anomalies of Fresh Water Fluxes. NOAA Atlas NESDIS 9. – Washington D.C., U.S. Gov. Printing Office. – 1994. – 308 p.
21. *Юровский А.В., Воскресенская Е.Н.* Изменчивость составляющих теплового баланса поверхности Земли по данным NCEP/NCAR // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь.: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2011. – вып. 16. – С. 241-245.
22. *Hasselmann K.* Stochastic climate models. Part I. Theory // Tellus. – 1976. – vol. 28. – P.473-485.
23. *Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J I., Boyer T.P., Garcia H.E., Levitus S.* World Ocean Atlas 2005, Vol. 1: Temperature. NOAA Atlas NESDIS 61. – Washington, D.C., U.S. Gov. Printing Office, 2006. – 182 p.
24. *Котляков В.М., Глазовский А.Ф., Фролов И.Е.* Оледенение в Арктике. Причины и следствия глобальных изменений // Вестник РАН. – 2010. – том 80, № 3. – С. 225-234
25. *Romanova V., Köhl A., Stammer D., Klepp C., Andersson A. and Bakan S.* Sea surface freshwater flux estimates from GECCO, HOAPS and NCEP. // Tellus, – 2010. – vol. 62. – P. 435-452.
26. *Базюра Е.А., Полонский А.Б., Юровский А.В.* О низкочастотной изменчивости турбулентных потоков тепла на акватории Мирового океана // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2009. – С. 305-308.
27. *Delworth T., Manabe S., Stouffer R.J.* Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere model // Journal of Climate. – 1993. – vol. 12. – P. 1993-2011.

Материал поступил в редакцию 15.11.2011 г.

АНОТАЦІЯ У рамках чотирьохбуксової моделі Північної Атлантики досліджен вплив на режими термохалінної циркуляції нелінійності рівнянь стану та зв'язку об'ємного транспорту з різницею щільності між північними і південними боксами, а також дрейфового перенесення між ними.

ABSTRACT The influence of the nonlinearity of equation of state and nonlinearity of equation of relation between the volume transport and the density difference between northern and southern boxes and drift transport between them exerted on thermohaline regimes (behaviour) within North Atlantic box model is investigated.