

ОБОБЩЕННАЯ ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА: ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ АДАПТАЦИИ СИСТЕМЫ «ОКЕАН-АТМОСФЕРА» НА АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

В рамках обобщенной модели глобального цикла углерода, воспроизводящей сезонную динамику углеродного цикла в океане с учетом зональной структуры океана и учитывающей зависимость переноса CO₂ через границу атмосфера-океан от температуры воды и воздуха, скорости ветра, вклада биоты, выполнен долгосрочный прогноз адаптации системы «океан-атмосфера» на антропогенное воздействие.

Ключевые слова: обобщенная динамико-стохастическая модель, углеродный цикл, долгосрочный прогноз, система «океан-атмосфера»

Введение. Проблема глобального цикла углерода и прогноз адаптации системы «океан-атмосфера» на антропогенное воздействие заданной интенсивности, по прежнему относится к числу крайне важных и актуальных задач современной океанологии, климатологии, а также гидро- и био-экологии [1]. Несмотря на возрастающее число работ по искомой проблематике [1-19], целый ряд ключевых вопросов в моделировании глобального углеродного цикла в океане с учетом различных атмосферных, океанических и биоэкологических факторов остаются далеки от своего разрешения. Ключевыми проблемами в моделировании глобального цикла углерода остаются адекватное определение зависимости переноса CO₂ через границу атмосфера-океан от температуры воды и воздуха, скорости ветра, выяснение буферного механизма растворения CO₂, корректное определение роли вклада биоты в глобальный углеродный цикл, и наконец, уточнение динамической модели с целью улучшения количественного аспекта прогноза. Относительно новой является проблема обнаружения элементов хаоса в динамике углеродного цикла [17, 20]. Также одной из относительно новых задач является долгосрочное прогнозирование динамики углеродного цикла в океане и адаптации системы «океан-атмосфера» на антропогенное воздействие. Именно решению этой задачи на основе ранее развитой нами обобщенной модели глобального цикла углерода [14-19], воспроизводящей сезонную динамику углеродного цикла в океане с учетом зональной структуры океана и учитывающей зависимость переноса CO₂ через границу атмосфера-океан от температуры воды и воздуха, скорости ветра, вклада биоты и других факторов.

Обобщенная модель глобального цикла углерода. Поскольку используемая нами обобщенная модель глобального углеродного цикла детально описана в наших работах [14-19], далее ограничимся изложением лишь ключевых аспектов. В ее рамках океан, поверхность которого свободна ото льдов, разбит на 56 зон по 2,5° географической широты. Типичная вертикальная стратификация океана включает верхний квазиоднородный (или перемешанный) слой, толщина которого в тропиках – около 100 м, а в высоких широтах – 10–20 м летом и сотни метров зимой, слой скачка температуры (сезонный термоклин), главный термоклин и глубинный слой. Как обычно, мы выделяем в каждой зоне океана три слоя: верхний квазиоднородный слой (ВКС) с переменной в течение года толщиной, термоклин и глубинный слой (ГС). Далее предполагается, что вода между 40° с.ш. и 40° ю.ш. медленно поднимается вверх (апвеллинг), а в высоких широтах медленно опускается (даунвеллинг), в ВКС направление движения воды от экватора к полюсам, в ГС направление движения воды противоположное. Однородная по вертикали атмосфера разбита на те же зоны, что и

океан. Мастерная система 224 дифференциальных уравнений, описывающих динамику глобального углеродного цикла, имеет вид [15]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} C_i^1 h_i - \left(\frac{dh_i}{dt} \pm V_i \right) C_i^1 &= F_i^{ao} - Q_{h_i-o} + L_i^1 - B_i^p + B_i^{1d}, \\ \frac{d}{dt} C_i^1 (H - h_i) + \left(\frac{dh_i}{dt} \pm V_i \right) C_i^2 &= Q_{h_i+o} + Q_i^T + B_i^{2d}, \\ \frac{d}{dt} C_i^3 (D - H) \pm V_i C_i^3 &= -Q_i^T + L_i^3 + B_i^{3d}, \\ \frac{dM_i^a}{dt} &= -F_i^{ao} ss_i^{0.012} + (F_i - F_{i-1}) V_i^a, \end{aligned} \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, 56$; C_i^1, C_i^2, C_i^3 – молярная концентрация неорганического углерода в ВКС, термоклин и ГС соответственно в i -й широтной зоне; M_i^a – масса углерода в виде CO_2 в i -й зоне атмосферы; h_i – глубина ВКС i -зоны океана, зависящая от времени года; V_i – скорость апвеллинга или даунвеллинга в зависимости от зоны; H – глубина нижней границы термоклина; D – средняя глубина океана; ss_i – площадь поверхности i -й зоны океана. Поток углерода на границе атмосфера-океан пропорционален разности парциальных давлений CO_2 в воздухе P_i^a и воде P_i^o на уровне моря

$$F_i^{ao} = k(u_i)(P_i^a - P_i^o)$$

где $k(u_i)$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от скорости ветра. В случае быстро перемешиваемой атмосферы будем полагать, что парциальное давление углекислого газа в атмосфере на уровне океана P_i^a пропорционально общей массе углерода в каждой зоне. В соответствии с [11], определим

$$P_i^a = \frac{k_a M_i^a R T_i^a}{s_i \mu},$$

где M_i^a – масса углекислого газа в i -й зоне атмосферы; s_i – площадь поверхности Земли, которая приходится на i -ю зону атмосферы; T_i^a – температура воздуха на уровне океана в i -й зоне (К); $\mu = 0.044$ кг/моль – молекулярный вес углекислого газа; $R = 8.31$ Дж/моль – универсальная газовая постоянная; $k_a = 0.01602$ – величина доли массы 100-метрового столба воздуха в массе столба воздуха высотой 10 км. Для учета парникового свойства углекислого газа, согласно [3, 15], в модель введена зависимость температуры воздуха и воды на уровне моря от содержания в атмосфере углекислого газа, то есть $T_i^a = T_i^{as} + \Delta T_i^a$ и $T_i^o = T_i^{os} + \Delta T_i^o$, где T_i^{as} и T_i^{os} – сезонные компоненты и $\Delta T_i^a, \Delta T_i^o$ – изменения температуры воздуха и воды соответственно, связанные с повышением содержания CO_2 в атмосфере, причем $\Delta T_i^a = \Delta T_i^o$. Приращение ΔT_i^a есть функция среднегодового общего содержания CO_2 в атмосфере. Парциальное давление растворенного в поверхностных водах углекислого газа прямо пропорционально содержанию углекислого газа в воде и обратно пропорционально растворимости CO_2 и описывается бикубическим сплайном вида $P_i^o = P_i^o(C_i^1, T_i^o)$. Турбулентный поток углерода на жидкой границе ВКС – термоклин описывается в рамках подхода Нефедова-Тарко [3]. Турбулентные потоки на нижней границе ВКС, верхней границе термоклина Q_{h_i+o} , на границе термоклин – глубинный слой Q_i^T определены в [14, 15]. Горизонтальные потоки углерода L_i^1, L_i^3 между зонами, обусловленные глобальной циркуляцией вод Мирового океана, определяются с помощью принятой схемы и

стандартного условия неразрывности водных масс. Во всех зонах апвеллинга его скорость одинакова (V_a), а скорость даунвеллинга определяется для каждого полушария также из условий неразрывности водных масс и независимости циркуляции воды в каждом полушарии. Для учета вклада деятельности морской биоты в (1) имеется поток B_i^p , т.е. скорость производства органического вещества в ВКС i -й зоны, а потоки B_i^{ld} , B_i^{2d} , B_i^{3d} – скорости разложения органического вещества в ВКС, термоклине и ГС i -й зоны, соответственно. Обмен углеродом между соседними зонами атмосферы происходит в процессе адвекции F_i^d

$$F_i = F_i^a + F_i^d, \quad i = 1, 2, \dots, 14,$$

где i – номер зоны. Величина адвективного потока углерода между выделенными зонами атмосферы пропорциональна разности концентраций углерода в этих зонах

$$F_i^a = (C_i^a - C_{i+1}^a) 2\pi a \cos \phi_i h_a V_i^*, \quad i = 1, 2, \dots, 14, \quad (2)$$

где $C_i^a = M_i^a / V_i^a$ – концентрация углерода в i -й зоне атмосферы; M_i^a – масса углерода в i -й зоне атмосферы; V_i^a – объем i -й зоны атмосферы; h_a – высота атмосферы; V_i^* – средняя скорость меридионального переноса в атмосфере; a – радиус Земли. Более последовательным является использование вместо (2) фоккер-планковской модели [17]. В качестве исходных данных в уравнениях модели использованы входные параметры, утилизирующие модели общей циркуляции атмосферы-океана [2, 9-13].

Данные численного эксперимента и выводы. Исследование динамики углеродного цикла в системе «атмосфера-океан» проводилось посредством интегрирования системы (1) методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Предполагалось, что уровень концентрации двуокиси углерода в атмосфере в ближайшие десятилетия стабилизируется (за период 1990-1999 гг. увеличение составляет около 1,5 ppm в год [1]). Взяв за точку отсчета атмосферную концентрацию CO_2 в 1998 г. (365 ppm) и увеличивая в течение последующих 15 лет концентрацию, постепенно уменьшая темпы изменения, мы попытались определить время, необходимое климатической системе «атмосфера-океан» для возврата концентрации CO_2 к уровню 1998 г. Легко подсчитать, что при заданных условиях концентрация двуокиси углерода в 2013 г. составит 377 ppm. По сути, определяемое время является временем самоадаптации климатической системы на внешнее воздействие. На рис. 1 представлены результаты интегрирования по модели, описанной выше, с учетом и без океанической биоты. После 2012 года концентрация CO_2 в атмосфере продолжает, хоть и незначительно, увеличиваться. В обоих случаях увеличение составляет около 0,2 ppm, однако когда биота не учитывается, оно наблюдается в течение 18 следующих за 2012 лет, а когда учитывается – на протяжении лишь 9 лет. Естественным было также ожидать влияние учета биотического фактора на период, в течение которого климатическая система адаптируется на антропогенное воздействие. Численный расчет с учетом биоты показывает, что возвращение к начальному уровню концентрации наблюдается приблизительно через 50-60 лет, тогда как в случае неучета биотического фактора искомое время возрастает до 90-100 лет. Отметим, что приведенные временные величины в целом согласуются с известными в настоящее время [1], однако, по нашему мнению, дальнейшее совершенствование модели глобального цикла двуокиси углерода (за счет учета, скажем, поглощения углекислого газа сушей, еще более радикального фактора, связанного с реализацией стохастического сценария переноса CO_2 и др. факторов) в системе «атмосфера-океан» может уточнить искомые временные интервалы и, главное, еще более повысить надежность получаемых в процессе моделирования данных.

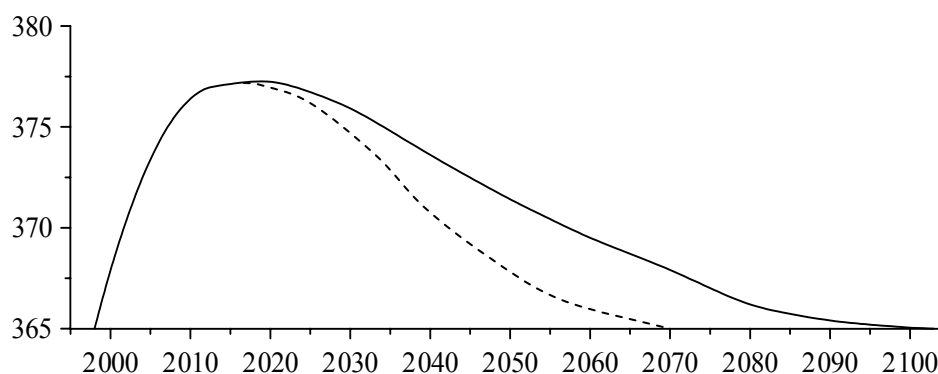


Рис. 1- Изменение средней концентрации углекислого газа: сплошная линия – без учета биоты, пунктирная линия – с учетом биоты;
Ось X – годы, ось Y – концентрация (ppm)

Список литературы

1. Изменение климата, 2001 г. Обобщенный доклад. – Женева: ВМО, 2003. – 520с.
2. Русов В.Д., Глушков А.В., Ващенко В.Н. Астрофизическая модель глобального климата Земли. – Киев: Наукова Думка, 2004. – 270 с.
3. Нефедова Е.И., Тарко А.М. Зональная модель глобального цикла двуокиси углерода в системе океан-атмосфера // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 1. – С. 11-15.
4. Ляхин Ю.И. Обмен CO₂ между океаном и атмосферой // Метеорология и гидрология. – 1982. – № 10. – С. 54-59.
5. Bacastow R., Maier-Reimer E. Ocean circulation model of the carbon cycle // Climate Dynamics. – 1990. – Vol. 4. – No. 2. – P. 95-125.
6. Parkinson S., Young P. Uncertainty and sensitivity in global carbon cycle modeling // Climate Research. – 1998. – Vol. 9. – No. 3. – P. 157-174.
7. Stephens B.B., Keeling R.F., Heimann M., Six K.D., Murnane R., Caldeira K. Testing global ocean carbon cycle models using measurements of atmospheric O₂ and CO₂ concentration // Global Biogeochemical Cycles. – 1998. – Vol. 12. – No. 2. – P. 213-230.
8. Bates N.R., Merlivat L. The influence of short-term wind variability on air-sea CO₂ exchange // Geophysical Research Letters. – 2001. – Vol. 28. – No. 17. – P. 3281-3284.
9. Plattner G-K., Joos F., Stocker T.F., Marchal O. Feedback mechanisms and sensitivities of ocean carbon uptake under global warming // Tellus. – 2001. – Vol. 53B. – N.5. – P. 564-592.
10. Jin X., Shi G. A simulation of CO₂ uptake in a three dimensional ocean carbon cycle model // Acta Meteorologica Sinica. – 2001. – Vol. 15. – No. 1. – P. 29-39.
11. Rivkin B.B., Legendre L. Biogenic carbon cycling in the upper ocean: effect of microbial respiration // Science. – 2001. – Vol. 291. – P. 2398-2400.
12. Kiehl J.T., Hack J.J., Bonan G.B., et al Description of the NCAR community climate model (CCM3): NCAR Technical Note NCAR/TN-420+STR.- Boulder, Colorado, 1996 – 158 p.
13. Rusov V.D., Glushkov A.V., Vaschenko V.N., Mavrodiev S., Vachev B. Galactic cosmic rays - cloud effect and bifurcation model of Earth global climate// Bound Vol. of Observatorie Montagne de Moussalla. – 2007. – Vol. 12. – P. 80-90.
14. Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Loboda N.S., Ponomarenko E.L. Computer modelling the global cycle of carbon dioxide in system of “atmosphere-ocean” and

environmental consequences of climate change // Environmental Informatics Arch. – 2003. – Vol. 1. – 125-130.

15. Глушков А.В., Хохлов В.Н., Сербов Н.Г., Свинаренко А.А., Солонко Т.В. Обобщенная динамико-стохастическая модель глобального цикла углерода: роль биоты в глобальном цикле углерода // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2008. – Вип. 6. – С. 234-239.

16. Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Loboda N.S., Solonko T.A., Svinarenko A.A. Physics of carbon and ozone cycle: carbon dioxide flux at atmosphere-ocean interface. Dynamics of the total ozone content changing in eurasia and southern hemisphere // Proc. of the XIV International Symposium "Optics of atmosphere and ocean. Physics of atmosphere". – Buryatia (Russia). – 2007. – P. D31.

17. Khetselius O.Yu., Serbov N.S., Solonko T.V. Modelling carbon dioxide cycle in system of atmosphere-ocean and spatio-temporal pattern formation and chaos in multi-level ecological models as applied to coupled plankton-fish dynamics // Proc. of the Second International Conference on Earth System Modelling. – Hamburg (Germany). – 2007. – P. 181.

18. Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Loboda N.S., Solonko T.V. Phytoplankton influence on atmospheric carbon dioxide under global climate change // Proc. of the International Symposium on Effects of Climate Change on the World's Oceans. – Gijón (Spain). – 2008. – P. 88.

19. Glushkov A.V., Khetselius O.Yu., Solonko T.V., Svinarenko A.A. Global cycle of carbon dioxide in system of atmosphere-ocean: computer modeling // Proc. of the XV International Symposium "Optics of atmosphere and ocean. Physics of atmosphere". – Krasnoyarsk (Russia). – 2008. – P. 71.

20. Glushkov A.V., Loboda N.S., Khokhlov V.N., Lovett L. Using non-decimated wavelet decomposition to analyse time variations of North Atlantic Oscillation, eddy kinetic energy, and Ukrainian precipitation // Journal of Hydrology (Elsevier). – 2006. – Vol. 322. – No. 1-4. – P. 14-24

Узагальнена динаміко-стохастична модель глобального циклу вуглецю: довготерміновий прогноз адаптації системи «океан-атмосфера» на антропогенну дію. Глушков О.В., Хохлов В.М.

Сербов М.Г., Свинаренко А.А., Серга Е.М., Лукаш Т.В.

В межах узагальненої моделі глобального циклу вуглецю, яка відбудовує сезону динаміку циклу вуглецю в океані з урахуванням зональної структури океану, залежності переносу CO₂ скрізь границю атмосфера-океан від температури води, повітря, швидкості вітру, внеску діяльності біоти, виконано довготерміновий прогноз адаптації системи «океан-атмосфера на антропогенну дію.

Ключові слова: узагальнена динаміко-стохастична модель, глобальний цикл вуглецю, довготерміновий прогноз, система «океан-атмосфера»

Generalized dynamical stochastic model of global cycle of the carbon: long-term forecast of adaptation for system of ocean-atmosphere at an anthropogenic action. Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Serbov N.G., Svinarenko A.A., Serga E.N., Lukash T.V.

It is carried out the long-term forecast of adaptation for system of "ocean-atmosphere" at an anthropogenic action within the generalized carbon global cycle model, which reproduces a season dynamics of carbon cycle in an ocean with account for the zone ocean structure, a dependence of the CO₂ transfer through the atmosphere-ocean boundary upon temperature of the water and air, wind velocity, biotical activity contribution.

Key words: generalized dynamical stochastic model, carbon cycle, long-term forecast, system "ocean-atmosphere".