

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

---

Одеський державний екологічний університет

**МЕТЕОРОЛОГІЯ, КЛІМАТОЛОГІЯ  
ТА ГІДРОЛОГІЯ**

**МІЖВІДОМЧИЙ НАУКОВИЙ ЗБІРНИК УКРАЇНИ**

Заснований у 1965 р.

**ВИПУСК 48**

Одеса  
«Екологія»  
2004

**В. Н. ХОХЛОВ**, канд. геогр. наук,

**Е. Н. ПОНОМАРЕНКО**,

**Т. В. СОЛОНКО**

Одесский государственный экологический университет

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ЦИКЛА ДВУОКСИ УГЛЕРОДА В СИСТЕМЕ «АТМОСФЕРА–ОКЕАН»: ПОТОК УГЛЕРОДА НА ГРАНИЦЕ АТМОСФЕРА–ОКЕАН**

В рамках модифицированной зональной модели выполнено исследование динамики углеродного цикла в системе атмосфера–океан. Проведено исследование чувствительности решений модели к изменению потока углерода на границе атмосфера–океан.

**Постановка задачи.** Проблема моделирования глобального цикла двуокиси углерода в системе атмосфера–океан относится к числу крайне важных и актуальных проблем (см. [1–6]). Увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере вследствие ряда факторов, в частности, активизации хозяйственной деятельности человека, приводит к потеплению климата и к изменению биопроцессов на планете. Искомая задача рассматривалась в целом ряде работ (см., напр., [1–6]). Реализация большинства из имеющихся моделей выполнена в среднегодовом режиме и, как правило, в самой общей форме учета неоднородности распределения углерода в биосфере, за исключением крупнотональных моделей Нефедова–Тарко и Bacastow–Mair-Reimer [3,6].

В настоящей работе в рамках модифицированной зональной модели выполнено исследование динамики углеродного цикла в системе атмосфера–океан. Проведено исследование чувствительности решений модели к изменению потока углерода на границе атмосфера–океан.

**Метод расчета.** В рамках модифицированной зональной модели [4, 5] глобального круговорота  $\text{CO}_2$  океан, поверхность которого свободна ото льдов, разбит на 28 зон по  $5^\circ$  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. В модели в каждой зоне океана выделены три слоя: верхний квазиоднородный слой (ВКС) с переменной в течение года толщиной, термоклин и глубинный слой (ГС). Таким образом, всего в океане выделены 84 блока. Предполагается, что вода между  $40^\circ$  с.ш. и  $40^\circ$  ю.ш. медленно поднимается вверх (ап

веллинг), а в высоких широтах медленно опускается (даунвеллинг), в ВКС направление движения воды от экватора к полюсам, а в ГС – направление противоположное. Однородная по вертикали атмосфера разбита на те же зоны, что и океан. Переменными модели являются молярная концентрация неорганического углерода в каждом выделенном блоке океана и содержание углеводорода в виде  $\text{CO}_2$  в каждой зоне атмосферы. Единица времени в модели – 1 месяц.

Сезонная динамика глобального углеродного цикла в системе «атмосфера–океан» описывается системой 112 нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (см. [1–3]):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} C_i^1 h_i - \left( \frac{dh_i}{dt} \pm V_i \right) C_i^1 &= F_i^{ao} - Q_{h_i-o} + L_i^1 - B_i^p + B_i^{1d}, \\ \frac{d}{dt} C_i^2 (H - h_i) + \left( \frac{dh_i}{dt} \pm V_i \right) C_i^2 &= Q_{h_i-o} + Q_i^T + B_i^{2d}, \\ \frac{d}{dt} C_i^3 (D - H) \pm V_i C_i^3 &= -Q_i^T + L_i^3 + B_i^{3d}, \\ \frac{dM_i^a}{dt} &= -F_i^{ao} ss_i^{0.012} + (F_i - F_1) V_i^a, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, \dots, 28$ ;  $C_i^1, C_i^2, C_i^3$  – молярная концентрация неорганического углерода в ВКС, термоклине и ГС соответственно в  $i$ -й широтной зоне;  $M_i^a$  – масса углерода в виде  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  в воздухе  $P_i^a$  и воде  $P_i^o$  на уровне моря:

$$F_i^{ao} = k(u_i)(P_i^a - P_i^o), \quad (2)$$

где  $k(u_i)$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от скорости ветра.

В соответствии с [6], определим:

$$P_i^a = k_a M_i^a R T_i^a / s_i \mu,$$

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);  $\mu$  – молекулярный вес углекислого газа;  $R$  – 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 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  $T_i^{as}$ ,  $T_i^{os}$  – сезонные компоненты и  $\Delta T_i^a$ ,  $\Delta T_i^o$  – изменения температуры воздуха и воды соответственно, связанные с повышением содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере, причем  $\Delta T_i^a = \Delta T_i^o$ . Приращение  $\Delta T_i^a$  есть функция среднегодового общего содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Для описания турбулентного потока углерода на жидкой границе ВКС–термоклин воспользуемся подходом, описанным в работе [3].

Предполагается, что турбулентные потоки на нижней границе ВКС  $Q_{h_i-o}$  обуславливаются вовлечением жидкости из сезонного термоклина при углублении ВКС и равны нулю в противоположном случае:

$$Q_{h_i-o} = \begin{cases} (C_i^1 - C_i^2) \left( \frac{dh_i}{dt} \pm V_i \right) & \text{при } \frac{dh_i}{dt} \pm V_i > 0, \\ 0 & \text{при } \frac{dh_i}{dt} \pm V_i \leq 0. \end{cases}$$

Турбулентные потоки  $C$  на верхней границе термоклина  $Q_{h_i+o}$  равны:

$$Q_{h_i+o} = \begin{cases} 0 & \text{при } \frac{dh_i}{dt} \pm V_i > 0, \\ -(C_i^1 - C_i^2) \left( \frac{dh_i}{dt} \pm V_i \right) & \text{при } \frac{dh_i}{dt} \pm V_i \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Турбулентные потоки  $C$  на границе термоклин–глубинный слой полагаются пропорциональными разности концентраций углерода в этих слоях с коэффициентом пропорциональности, не зависящим от времени:

$$Q_i^T = K^T (C_i^3 - C_i^2). \quad (4)$$

В модели учтена деятельность морской биоты, а именно в системе уравнений (1) поток  $B_i^p$  есть скорость производства органического вещества в ВКС  $i$ -й зоны, а потоки  $B_i^{1d}$ ,  $B_i^{2d}$ ,  $B_i^{3d}$  – скорости разложения органического вещества в ВКС, термоклине и ГС  $i$ -й зоны, соответственно. При описании сезонной изменчивости этих потоков была использована процедура, описанная в [6] с ее модификацией на зональный масштаб модели и распространением на оба полушария. Считается также, что обмен углеродом между соседними зонами атмосферы происходит в процессе адвекции  $F_i^d$ :

$$F_i = F_i^a + F_i^d, \quad i = 1, 2, \dots, 14, \quad (5)$$

где  $i$  – номер зоны.

Величина адвективного потока  $C$  между выделенными зонами атмосферы пропорциональна разности концентраций  $C$  в этих зонах:

$$F_i^a = (C_i^a - C_{i+1}^a) 2\pi \cos(\phi_i) h_a V_i^*, \quad i = 1, 2, \dots, 14, \quad (6)$$

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

**Результаты моделирования.** Была исследована динамика углеродного цикла в системе АО при отсутствии антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Было найдено периодическое решение системы (1). Для этого система (1) численно интегрировалась методом Рунге–Кутты при заданных начальных значениях переменных до выхода решения на периодический режим. Получен годовой ход парциального давления растворенного  $\text{CO}_2$  для некоторых широт (предварительные результаты). При анализе амплитуды колебаний этой характеристики в течение года на разных широтах обнаруживается связь, как и для концентрации неорганического углерода, с амплитудой колебаний толщины ВКС. Для рассматриваемого решения среднегодовая концентрация углекислого газа в атмосфере составляет  $290,3 \text{ млн}^{-1}$ . Мы провели детальный анализ распределения величины обмена углекислым газом на границе атмосфера–океан. С этой целью варьировались параметры уравнения (2).

Как и ранее расчет показал, что в экваториальной и тропической зонах океана идет постоянное выделение  $\text{CO}_2$  из океана, а океан высоких широт является стоком для атмосферного  $\text{CO}_2$ . Океан умеренных широт ( $30^\circ - 40^\circ \text{с.ш.}$ ) в течение зимы – начала весны поглощает углерод из атмосферы, а в течение остальной части года служит источником для атмосферного  $\text{CO}_2$ . Ключевой результат данного анализа состоит в том, что при усилении ветрового перемешивания верхнего слоя океана происходит увеличение массы планктона, а переносимые ветром частички способствуют более быстрому погружению раковин и органического материала, в конечном итоге накапливающегося в осадках. В результате из атмосферы в океан и обратно поток углерода увеличивается. Вариация параметров уравнений (2) и (4) приводит к изменению среднегодовой концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере на  $\sim 3-8 \text{ млн}^{-1}$ .

#### Л и т е р а т у р а

1. *Алекин О.А., Ляхин Ю.И.* Химия океана. – Л: Гидрометеиздат, 1984. – 343 с.
2. *Ляхин Ю.И.* Обмен  $\text{CO}_2$  между океаном и атмосферой // Метеорология и гидрология. – 1982. – № 10. – С. 54–59.

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. *Глушков А.В., Боровская Г.П., Пономаренко Е.Л.* Моделирование глобального цикла CO<sub>2</sub> в системе «атмосфера–океан». Сценарий хаоса // *Тез. междунар. конф. «Экология Сибири, Дальнего Востока и Арктики»*. – Томск: СО, 2001. – 131 с.

5. *Пономаренко Е.Л., Боровская Г.А.* Моделирование глобального цикла двуокиси углерода в системе «атмосфера–океан» // *Метеорология, климатология и гидрология*. – 2002. – № 45. – С. 11–15.

5. *Bacastow R.* Numerical evolution of evasion factor // In: *Carbon Cycle Modelling*, SCOPE 16. – N.-Y., 1981. – P. 95–101.

6. *Bacastow R., Mair-Reimer E.* Ocean-circulation model of the carbon cycle // *Clim.Dynamics*. – 1990. – № 4. – P. 95–125.

**V. N. Khokhlov, E. L. Ponomarenko, T. V. Solonko**

#### **MODELLING THE CARBON DIOXIDE GLOBAL CYCLE IN THE ATMOSPHERE–OCEAN SYSTEM**

The investigation of the carbon cycle dynamics in atmosphere–ocean system was made in the range of modified zone model. The investigation of sensitivity of model solution to the change of carbon flow on the atmosphere–ocean boundary influences was given.

Поступила 24.02.2004