

А.В.Глушков, д.ф.-м.н., В.Н. Хохлов, д.г.н., Н.Г. Сербов, к.г.н.,

А.А. Свинарченко, к.ф.-м.н., Т.В. Солонко, асп.

Одесский государственный экологический университет

## ОБОБЩЕННАЯ ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА: РОЛЬ БИОТЫ В ГЛОБАЛЬНОМ ЦИКЛЕ УГЛЕРОДА

*Рассмотрена обобщенная модель глобального цикла углерода, позволяющая воспроизвести сезонную динамику углеродного цикла в океане с учетом зональной структуры океана и учитывающая зависимость переноса  $\text{CO}_2$  через границу атмосфера-океан от температуры воды и воздуха, скорости ветра, а также буферный механизм растворения  $\text{CO}_2$  и вклад биоты.*

**Ключевые слова:** обобщенная динамико-стохастическая модель, глобальный цикл углерода

**Введение.** Как известно, проблема глобального цикла углерода имеет фундаментальное значение как для адекватного моделирования глобальных климатических процессов, так и целого ряда проблем гидро- и биоэкологии [1]. Разумеется, искомая проблема рассматривалась в достаточно большом количестве публикаций (см. [1-16] и ссылки в этих публикациях). Классическими являются модели, описывающие с той или иной степенью точности сезонную динамику углеродного цикла в системе «атмосфера-океан». Речь, в частности, идет о моделях, предложенных в работах [2-13]. Ключевыми проблемами в моделировании глобального цикла углерода остаются адекватное определение зависимости переноса  $\text{CO}_2$  через границу атмосфера-океан от температуры воды и воздуха, скорости ветра, выяснение буферного механизма растворения  $\text{CO}_2$ , корректное определение роли вклада биоты в глобальный углеродный цикл, и наконец, уточнение динамической модели с целью улучшения количественного аспекта прогноза. На рис. 1 представлена качественная схема глобального цикла с учетом перечисленных факторов.

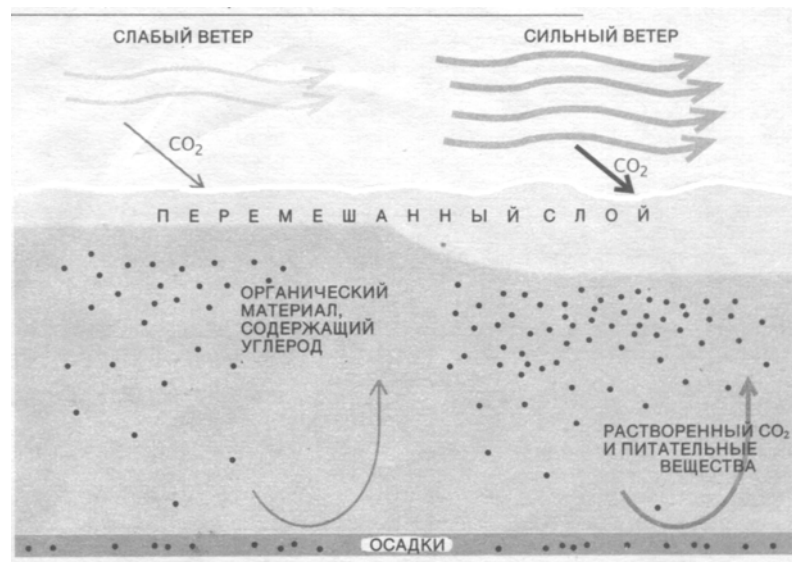


Рис. 1 – Качественная схема глобального цикла  $\text{CO}_2$ .

Относительно новой является проблема обнаружения элементов хаоса в динамике углеродного цикла [14-16]. В данной статье рассмотрена обобщенная динамико-стохастическая модель глобального цикла углерода, в рамках которой моделируется пространственно-временное распределение концентрации неорганического углерода в

океане, парциального давления растворенного CO<sub>2</sub> и величины обмена CO<sub>2</sub> на границе атмосфера-океан, а также рассмотрен вклад биоты.

**Обобщенная модель глобального цикла углерода.** В отличие от моделей глобального цикла, рассмотренных в работах [2,3,11], в предлагаемой в этой статье модели глобального круговорота CO<sub>2</sub> 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 [13,14]:

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

где  $i = 1, 2, \dots, 56$ ;  $C_i^1, C_i^2, C_i^3$  – молярная концентрация неорганического углерода в ВКС, термоклине и ГС соответственно в  $i$ -й широтной зоне;  $M_i^a$  – масса углерода в виде CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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 случае быстро перемешивающейся 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.

Согласно [2, 11], 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  $T_i^{as}$  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  $\text{CO}_2$  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. Парциальное давление растворенного в поверхностных водах углекислого газа прямо пропорционально содержанию углекислого газа в воде и обратно пропорционально растворимости  $\text{CO}_2$  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 [2]. При этом 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

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

Соответственно турбулентные потоки углерода на верхней границе термоклина  $Q_{h_i+o}$  равны

$$Q_{h_i+o} = \begin{cases} 0 & \text{при } \frac{dh_i}{dt} \pm V_i > 0; \\ (C_i^1 - C_i^2) \left( \frac{dh_i}{dt} \pm V_i \right) & \text{при } \frac{dh_i}{dt} \pm V_i \leq 0. \end{cases} \quad (4)$$

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

$$Q_i^T = K^T (C_i^3 - C_i^2). \quad (5)$$

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 системе (1) имеется поток  $B_i^p$ , т.е. 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. Обмен углеродом между соседними зонами атмосферы происходит в процессе адвекции  $F_i^d$

$$F_i = F_i^a + F_i^d, \quad i = 1, 2, \dots, 14, \quad (6)$$

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

$$F_i^a = (C_i^a - C_{i+1}^a) 2\pi a \cos \phi_i h_a V_i^*, \quad i = 1, 2, \dots, 14, \quad (7)$$

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 (7) фоккер-планковской модели [13]. В качестве исходных данных в уравнениях модели использованы входные параметры, утилизирующие модели общей циркуляции атмосферы-океана (см. [8-10,16]).

**Численные эксперименты.** Исследование динамики углеродного цикла в системе «атмосфера-океан» проводилось посредством интегрирования системы (1) методом Рунге-Кутты 4-го порядка. На рис. 2 представлено изменение парциального давления растворенного в верхнем квазиоднородном слое углекислого газа в трех поясах: экваториальных, средних и приполярных широтах Северного полушария (изменения в течение года парциального давления  $\text{CO}_2 (10^{-3} \text{ гПа})$ , растворенного в ВКС).

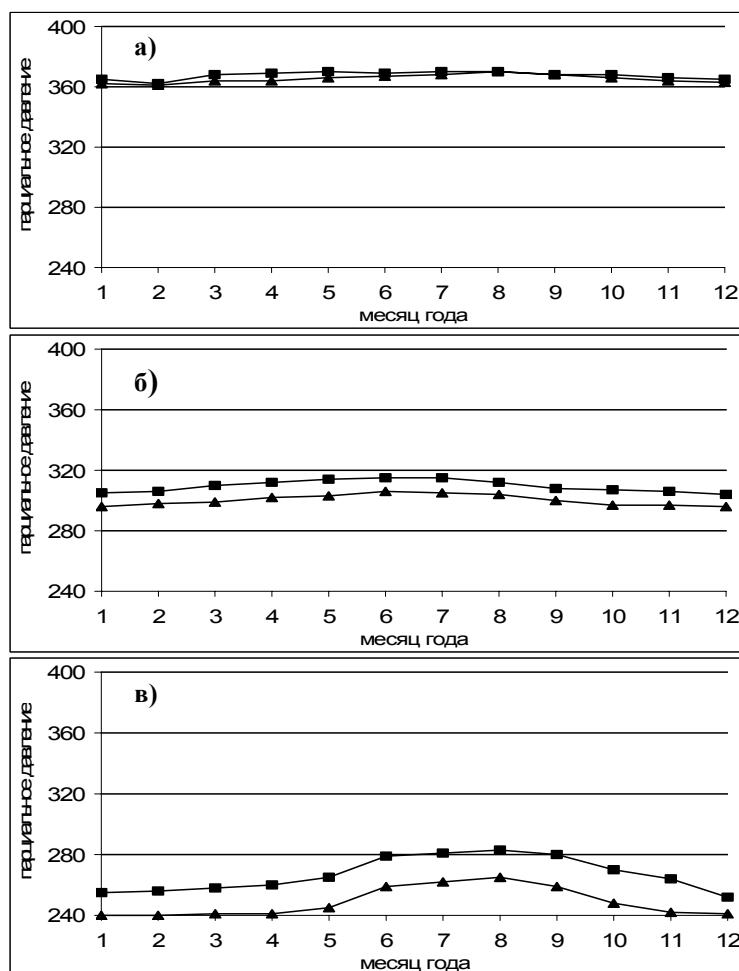


Рис. 2 - Изменения в течение года парциального давления  $\text{CO}_2$ , растворенного в ВКС: а) 0-10° с.ш., б) 30-40° с.ш, в) 60-70° с.ш. (■ – без учета биоты; ▲ – с учетом биоты).

Естественно, наибольшее количество  $\text{CO}_2$  находится в районе экватора, а наименьшее – вблизи полярного круга. При этом наиболее ярко выражен годовой ход (минимум в холодное полугодие и максимум – в теплое) в широтном поясе 65-75° с.ш. Другая

особенность связана с наибольшей разницей (достигающей  $25 \times 10^{-3}$  гПа; около 11%) между месячными значениями, полученными с и без учета биоты. На рис.3 приведены изменения в течение года скорости обмена  $\text{CO}_2$  ( $10^{-3}$  кгм $^{-2}$  месяц $^{-1}$ ) на границе океан-атмосфера. а) 0-10°с.ш., б) 30-40°с.ш., в) 60-70° с.ш.: ■ – без учета биоты; ▲ – с учетом биоты. В экваториальной зоне океана идет постоянное выделение  $\text{CO}_2$  из океана (отрицательные значения  $F_i^{ao}$ ), а океан высоких широт является стоком для атмосферного  $\text{CO}_2$ . Океан умеренных широт (30-40° с.ш.) в течение зимы – начала весны поглощает углерод из атмосферы, а в течение остальной части года служит источником для атмосферного  $\text{CO}_2$ .

Наконец, в океан приполярных регионов в течение всего года поступает двуокись углерода из атмосферы. Во-вторых, за счет океанической биоты во всех зонах океана обмен углекислым газом на границе океан-атмосфера несколько увеличивается в сторону потока из атмосферы (около 10%), что согласуется с результатами, представленными на рис. 2 (см. также [17]). В заключение отметим, что, как показывает детальный количественный анализ, реализованная в данной работе модель в сравнении с другими моделями глобального цикла представляется в количественном отношении более адекватной.

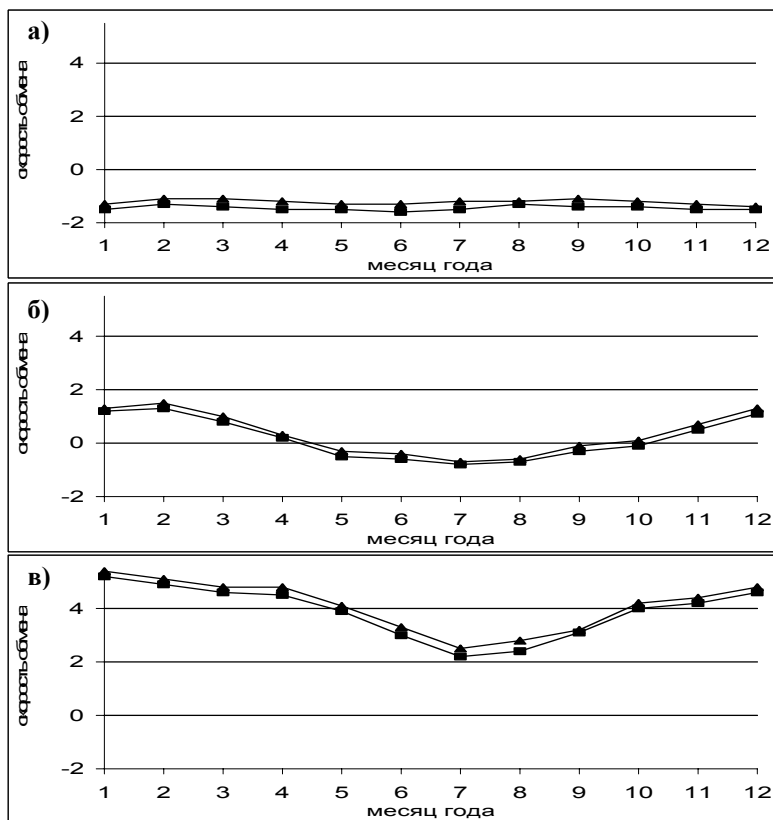


Рис. 3 - Изменения скорости обмена  $\text{CO}_2$  на границе атмосфера-океан.

### Список литературы

1. *Изменение климата*, 2001 г. Обобщенный доклад. – Женева: ВМО, 2003. – 520 с.
2. *Нефедова Е.И., Тарко А.М.*, Зональная модель глобального цикла двуокиси углерода в системе океан-

- атмосфера // Метеорология и гидрология. – 1995. - № 1. – С. 11-15.
3. Ляхин Ю.И., Обмен CO<sub>2</sub> между океаном и атмосферой // Метеорология и гидрология. – 1982. – № 10. – С. 54-59.
4. Bacastow R., Maier-Reimer E., Ocean circulation model of the carbon cycle // Climate Dynamics. – 1990. – Vol. 4. – No. 2. – P. 95-125.
5. Parkinson S., Young P., Uncertainty and sensitivity in global carbon cycle modeling // Climate Research. – 1998. – Vol. 9. – No. 3. – P. 157-174.
6. 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 O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentration // Global Biogeochemical Cycles. – 1998. – Vol. 12. – No. 2. – P. 213-230.
7. Bates N.R., Merlivat L., The influence of short-term wind variability on air-sea CO<sub>2</sub> exchange // Geophysical Research Letters. – 2001. – Vol. 28. – No. 17. – P. 3281-3284.
8. 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.
9. Jin X., Shi G., A simulation of CO<sub>2</sub> uptake in a three dimensional ocean carbon cycle model // Acta Meteorologica Sinica. – 2001. – Vol. 15. – No. 1. – P. 29-39.
10. 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.
11. 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 Archives. – 2003. – Vol. 1. – 125-130.
12. Glushkov A.V., Loboda N.S., Khokhlov V.N., Modelling global cycle of carbon dioxide in system of “atmosphere-ocean” and global warming effect // Proc. Int. Conf. Earth System Modelling. – Hamburg (Germany). – 2003. – P. 285.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
16. 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. – 2006. – Vol. 322. – No. 1-4. – P. 14-24
17. Rivkin B.B., Legendre L., Biogenic carbon cycling in the upper ocean: effect of microbial respiration // Science. – 2001. – Vol. 291. – P. 2398-2400.

**Узагальнена динаміко-стохастична модель глобального циклу вуглецю: внесок біоти у глобальний цикл вуглецю. Глушков О.В., Хохлов В.М., Сербов М.Г., Свинаренко А.А., Солонко Т.В.**

*Розглянуто узагальнену модель глобального циклу вуглецю, яка дозволяє збудувати сезону динаміку циклу вуглецю в океані з урахуванням зональної структури океану, залежності переносу CO<sub>2</sub> скрізь границю атмосфера-океан від температури води, повітря, швидкості вітру, а також буферного механізму розчинення CO<sub>2</sub> і внеску діяльності біоти.*

**Ключові слова:** узагальнена динаміко-стохастична модель, глобальний цикл вуглецю

**Generalized dynamical stochastic model of global cycle of the carbon : biotical contribution to global carbon cycle. Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Serbov N.G., Svinarenko A.A., Solonko T.V.**

*It is proposed a generalized carbon global cycle model, allowing to reproduce a season dynamics of carbon cycle in an ocean with account for the zone ocean structure, a dependence of the CO<sub>2</sub> transfer through the atmosphere-ocean boundary upon temperature of the water and air, wind velocity, and also the buffer mechanism of the CO<sub>2</sub> dissolution and biotical activity contribution.*

**Key words:** generalized dynamical stochastic model, carbon global cycle