

# РАСЧЕТ ЭВОЛЮЦИИ ТРЕХМЕРНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АТМОСФЕРНОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИВМ РАН

*Е.М. Володин<sup>2</sup>, П.А. Пережогин<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Московский физико-технический институт*  
<sup>2</sup>*Институт вычислительной математики РАН*  
*volodin@inm.ras.ru; pperezhogin@gmail.com*

## **Введение**

Одной из наиболее важных задач современной климатологии является прогноз изменений климата в течение будущих десятилетий или столетий. Основным инструментом для таких прогнозов являются климатические модели, которые наиболее полно учитывают все основные климатообразующие процессы. Как ожидается, наиболее заметный вклад в будущие изменения климата будет вносить увеличение концентрации парниковых газов и, в первую очередь, углекислого газа [10], вследствие деятельности человека. Поэтому точность предсказания изменений климата не в последнюю очередь зависит от точности воспроизведения в климатических моделях концентрации углекислого газа.

Углекислый газ в атмосфере является хорошо перемешанным, и во многих климатических моделях его атмосферная концентрация считается не зависящей от пространственных координат. Отклонение концентрации  $\text{CO}_2$  в какой-либо точке атмосферы от усредненной по всей атмосфере может достигать  $10\text{--}20 \text{ млн}^{-1}$ , т. е. нескольких процентов от концентрации, усредненной по всей атмосфере, которая, напомним, составляет сейчас около  $400 \text{ млн}^{-1}$ , а в доиндустриальное время была равна примерно  $280 \text{ млн}^{-1}$ . Такие отклонения не могут заметно сказаться на величине парникового

эффекта и радиационном балансе в выбранном месте, но могут заметно изменить величину потоков  $\text{CO}_2$  в атмосферу, прежде всего из океана. Поэтому все больше климатических моделей рассматривают эволюцию трехмерной концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере [8, 9, 12].

Такие модели, называемые моделями земной климатической системы, включают в себя подмодель экосистем суши, где рассчитывается масса углерода, содержащегося в растениях и почве, и обмен углекислым газом между растениями, почвой и атмосферой вследствие процессов фотосинтеза, дыхания, отмирания растений и разложения органики почвы. Модели включают в себя также расчет эволюции растворенного углекислого газа в океане. Целью настоящей работы является включение в климатическую модель ИВМ РАН эволюции трехмерной концентрации углекислого газа в атмосфере и сравнение изменения концентрации и потоков  $\text{CO}_2$  в модели с имеющимися оценками по данным наблюдений.

### **Описание модели и численного эксперимента**

Используется климатическая модель Института вычислительной математики (ИВМ) РАН [3] с разрешением в атмосферном блоке  $5^\circ \times 4^\circ$  по долготе и широте и 21 уровнем по вертикали от поверхности Земли до 10 гПа. В океане разрешение составляет  $2,5^\circ \times 2^\circ$  по долготе и широте и 33 уровня. Шаг по времени составляет в атмосферном блоке 12 минут, в блоке океана 2 часа. Блоки атмосферы и океана обмениваются между собой данными каждые 2 часа. В исходной версии модели предполагалось, что  $\text{CO}_2$  в атмосфере хорошо перемешан. Эволюция массы  $\text{CO}_2$  в атмосфере рассчитывалась с учетом потоков из растительности, почвы и потока с поверхности океана, которые вычислялись в модели, а также потока вследствие сжигания топлива и землепользования вследствие деятельности человека, который был задан согласно [2].

При расчете потоков  $\text{CO}_2$  из растительности учитывались процессы фотосинтеза, дыхания и отмирания растений, накопления органических остатков в почве и их разложения под действием микроорганизмов. За основу модели наземных экосистем взята модель [5], сравнение элементов наземного углеродного цикла с имеющимися оценками по данными наблюдений описано в [2].

В блоке океана рассчитывается эволюция растворенного в воде углерода. Интерактивная модель морских экосистем отсутствует, считается, что морские организмы поглощают углерод в верхнем слое и, умирая, падают на дно и разлагаются, обогащая углеродом более глубокие слои, тем самым порождая поток углерода сверху вниз. Величина этого потока в данной версии модели предписана и не зависит от времени, долготы и широты.

Поток углекислого газа из океана в атмосферу  $F$  вычисляется согласно

$$F = k(C_W - \alpha C_A),$$

где  $k$  – коэффициент обмена, вычисляемый исходя из приземной скорости ветра по эмпирическим формулам согласно [13],  $C_W$  и  $C_A$  – концентрация углекислого газа в данном узле пространственной сетки модели в воде и атмосфере;  $\alpha$  – константа Оствальда.

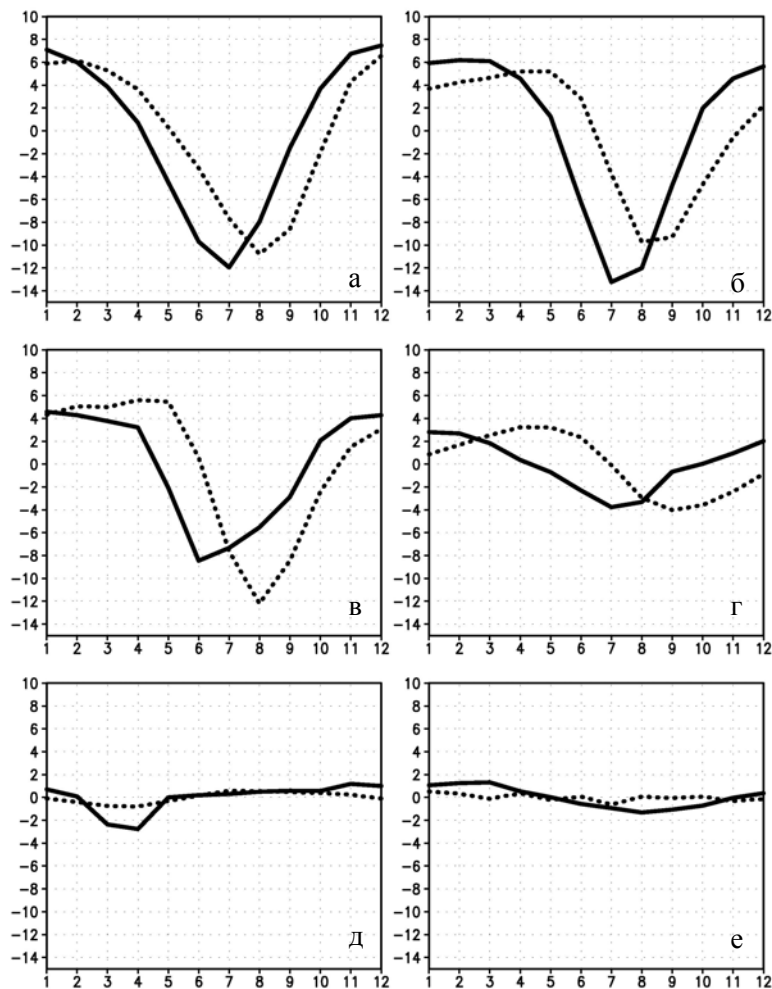
Исходная версия модели дополнена блоком эволюции углекислого газа в атмосфере, которая включает в себя перенос  $\text{CO}_2$  скоростями ветра, вертикальную и горизонтальную диффузию, а также учет перечисленных выше потоков с поверхности. Перенос рассчитывается по схеме центральных разностей по пространству и времени, как это сделано в модели для переноса других веществ, например влаги [1]. С моделью проведен численный эксперимент продолжительностью 100 модельных лет в режиме преиндустриального климата, т. е. с нулевыми антропогенными эмиссиями  $\text{CO}_2$ . Рассматривается равновесный климат, т. е. такой, что суммарные потоки углекислого газа из океана и из наземных экосистем в атмосферу, осредненные за год, близки к нулю, а средняя концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере близка к  $285 \text{ млн}^{-1}$ . Наблюдаемая эволюция  $\text{CO}_2$  в атмосфере, конечно, зависит от антропогенных источников, однако в данной работе сравнивается годовой ход концентрации и потоков этого газа, при вычислении которого тренд, связанный с постоянно действующим антропогенным источником, был исключен методом [4]. В начальный момент концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере была задана равномерно распределенной и равной  $285 \text{ млн}^{-1}$ , что соответствует 1850 году.

## Результаты моделирования

Трехмерных данных наблюдений концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, насколько известно авторам, на настоящий момент нет, поэтому сравним временной ход приземной концентрации этого газа по данным модели с наблюдениями в тех точках, где эти наблюдения доступны. Поскольку такие наблюдения содержат как колебания, связанные в первую очередь с годовым ходом потоков  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем и из океана, так и переменный во времени, но практически не зависящий от пространственных координат тренд, связанный с антропогенным потоком  $\text{CO}_2$ , сравним изменчивость концентрации, связанную с естественными факторами, для чего выделим средний годовой ход по данным модели и наблюдений. Именно годовой ход концентрации  $\text{CO}_2$  по данным модели сравнивается с данными наблюдений при валидации блока эволюции  $\text{CO}_2$  и в других работах, например в [8, 9, 12].

Годовой ход приземной концентрации углекислого газа для шести станций, где имеются наблюдения [6], представлен на рис. 1. Амплитуда годового хода для всех станций неплохо получается в модели. Самая большая амплитуда, достигающая  $10 \text{ млн}^{-1}$ , наблюдается на станциях, расположенных в умеренных и высоких широтах Северного полушария, как на суше, так и над океаном. Это связано с влиянием потока  $\text{CO}_2$  из атмосферы из наземных экосистем, который имеет большую амплитуду годового хода в Северном полушарии и гораздо меньшую амплитуду годового хода в тропиках и умеренных широтах Южного полушария. Чем южнее расположена станция наблюдений, тем меньше амплитуда наблюдаемого и модельного годового хода. Для двух станций Южного полушария амплитуда не превышает  $1\text{--}2 \text{ млн}^{-1}$ .

Существенное различие между данными модели и наблюдений состоит в том, что максимум и минимум в Северном полушарии в модели наступает раньше, чем в наблюдениях, на 1–2 месяца в умеренных и высоких широтах и на 2–3 месяца в тропиках. Это, вероятно, связано с тем, что максимум и минимум потока  $\text{CO}_2$  в атмосферу из наземных экосистем в модели происходит раньше, чем в природе.



**Рис. 1. Годовой ход приземной концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере (млн<sup>-1</sup>) по данным модели (сплошная линия) и наблюдений [6] (пунктирная линия): Балтийское море (55,4° с.ш., 17,1° в.д.) (а); Канада, Алерт (82,4° с.ш., 62,5° з.д.) (б); Алеутские о-ва (52,7° с.ш., 174,1° в.д.) (в); Виргинские о-ва (17,7° с.ш., 64,7° з.д.) (г); о. Асеншн (7,9° ю.ш., 14,4° з.д.) (е); о. Пасхи (27,2° ю.ш., 109,4° з.д.) (е). Из данных вычтен средний тренд. По оси абсцисс указаны номера месяцев.**

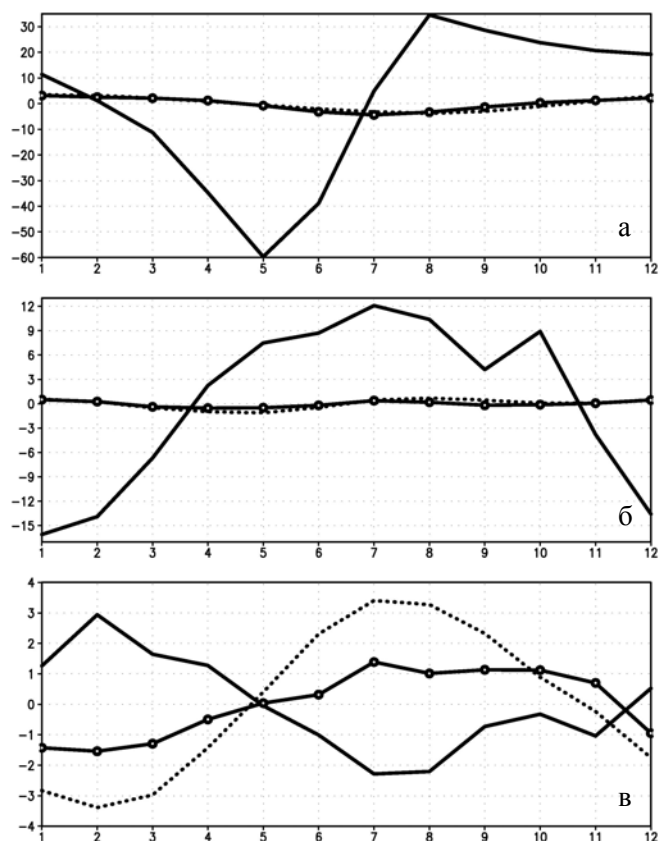
Такой недостаток модели может быть связан с несовершенством или излишней простотой модели наземных экосистем. Например, в модели не учитывается, что массовое опадание листьев и их последующее интенсивное разложение с выделением  $\text{CO}_2$  происходит лишь осенью. Оценка климатологии годового хода концентрации  $\text{CO}_2$  по спутниковым измерениям [11] в рассматриваемых точках близка к приведенным на рис. 1 наблюдениям.

Непосредственно данных измерений глобальных потоков  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем в атмосферу не существует, и модельные потоки (рис. 2) сравнить не с чем. Тем не менее можно заключить, что в умеренных широтах и тропиках амплитуда годового хода потока из наземных экосистем примерно на порядок больше, чем потока из океана. Минимум потока во внетропических широтах Северного полушария достигается в модели в мае, а в природе, по видимому, должен происходить позднее.

Годовой ход потока из океана в модели примерно соответствует оценкам по данным наблюдений [13]. Однако такая оценка получена из оценок концентрации  $\text{CO}_2$  в приземном слое атмосферы и верхнем слое океана и не является непосредственно наблюдаемой величиной.

Рис. 2 показывает также, что амплитуда годового хода потока  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем велика во внетропических широтах Северного полушария и достигает  $60 \times 10^6$  моль/с. В тропиках амплитуда потока  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем составляет  $15 \times 10^6$  моль/с, а во внетропических широтах Южного полушария – только  $2\text{--}3 \times 10^6$  моль/с. Амплитуда потока  $\text{CO}_2$  из океана как в тропиках, так и в умеренных широтах обоих полушарий составляет  $2\text{--}3 \times 10^6$  моль/с.

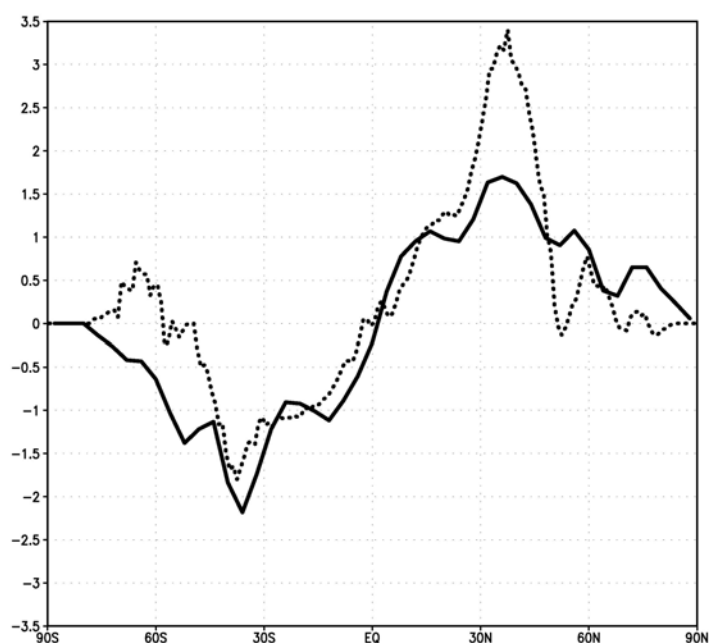
Во внетропических широтах обоих полушарий потоки  $\text{CO}_2$  из океана достигают экстремальных значений в январе и июле. Поэтому имеет смысл рассмотреть разность потоков из океана в атмосферу именно для этих двух месяцев в зависимости от широты по данным модели и оценку по данным наблюдений [13] (рис. 3). Эта разность в модели в основном похожа на оценку потока в природе. Лишь в умеренных широтах Северного полушария поток  $\text{CO}_2$  из океана в атмосферу занижен в 1,5–2 раза.



**Рис. 2. Годовой ход потока CO<sub>2</sub> в атмосферу (10<sup>6</sup> моль/с): осредненный по северным внетропическим широтам, 24–90°с.ш. (а); тропикам, 24°ю.ш.–24°с.ш. (б); южным внетропическим широтам, 90–24° ю.ш. (в). Сплошная линия без меток – поток из наземных экосистем в модели ИВМ, сплошная линия с кружками – поток из океана в модели ИВМ, пунктирная линия – оценка потока из океана [13].**  
По оси абсцисс указаны номера месяцев.

Представленная на рисунке разность определяется в основном тем, что океан в летнем полушарии выделяет, а в зимнем поглощает CO<sub>2</sub> из-за его более низкой растворимости в воде при более

высокой температуре, а не изменением концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере. В исходной версии модели, где поток  $\text{CO}_2$  из океана вычисляется по усредненной концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, разность потоков из океана между июлем и январем довольно близка к той, что представлена для модели с трехмерным распределением  $\text{CO}_2$  на рис. 3 (не показано).

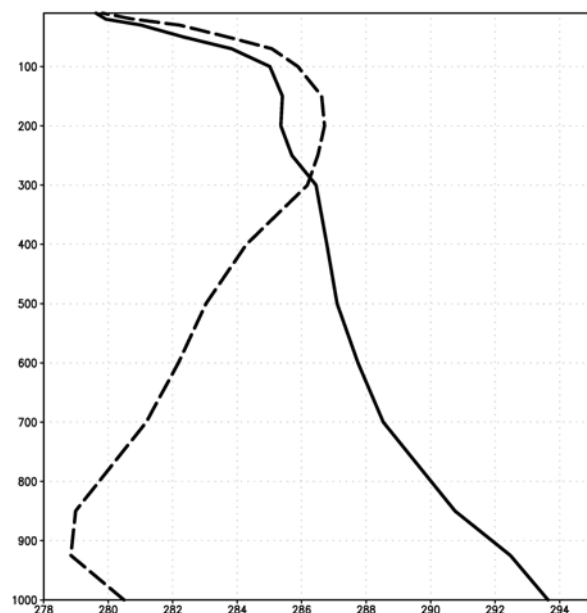


**Рис. 3. Разность потоков  $\text{CO}_2$  из океана в атмосферу, моль/(м с), в июле и январе, осредненных вдоль круга широты, по данным модели ИВМ (сплошная линия) и оценка [13] (пунктирная линия).**

Вертикальные профили концентрации  $\text{CO}_2$ , осредненные от  $50^\circ$  до  $60^\circ$  с.ш. по всем долготам в мае и июле представлены на рис. 4. Аналогичные профили по спутниковым измерениям для различных лет можно найти в [7]. Как в модели, так и в данных наблюдений в мае концентрация  $\text{CO}_2$  в нижней тропосфере в мае примерно на  $6\text{--}8 \text{ млн}^{-1}$  выше, чем вблизи тропопаузы (200 гПа), а в



июле – на 6–8 млн<sup>-1</sup> ниже. Отличие определяется в основном потоками в начале лета из наземных экосистем.



**Рис. 4. Вертикальный профиль концентрации CO<sub>2</sub> (млн<sup>-1</sup>) в модели, усредненный по 50–60° с.ш. по всем долготам в мае (сплошная линия) и июле (штриховая линия).**

### Заключение

В модель климатической системы ИВМ РАН включен расчет эволюции трехмерной концентрации углекислого газа в атмосфере. Показано, что модель в основном правильно воспроизводит амплитуду годового хода приземной концентрации CO<sub>2</sub> в тех местах, где имеются регулярные наблюдения, однако максимум и минимум концентрации достигается по данным модели, как правило, на 1–3 месяца раньше, чем по данным наблюдений. По данным моделей [8, 9, 12], где проводится аналогичное сравнение, ошибка во времени меньше. Это связано, скорее всего, с несовершенством

параметризации потоков CO<sub>2</sub> из наземных экосистем, используемой в климатической модели ИВМ РАН. Годовой ход потока CO<sub>2</sub> из океана в атмосферу в модели в основном соответствует имеющимся оценкам по данным наблюдений.

Работа выполнена в ИВМ РАН при поддержке гранта РФФИ 14-27-00126.

#### Список использованных источников

1. Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лыкосов В.Н. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. – М.: Препринт ИВМ РАН, 1998. – 180 с.
2. Володин Е.М. Модель общей циркуляции атмосферы и океана с углеродным циклом // Известия РАН. ФАО. – 2007. – Т. 43, № 3. – С. 298–313.
3. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4.0 // Известия РАН. ФАО. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 448–466.
4. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница» SSA: анализ временных рядов. – СПб: СПб ун-т, 2004. – 74 с.
5. Bonan G.B. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological and atmospheric studies: technical description and user's guide // NCAR Technical Note 417. – Boulder, Colorado: NCAR, 1996. – 156 p.
6. Dlugokencky E.J., Lang P.M., Masarie K.A., Crotwell A.M., Crotwell M.J. Atmospheric Carbon Dioxide Dry Air Mole Fractions from the NOAA ESRL Carbon Cycle Cooperative Global Air Sampling Network, 1968-2013, Version: 2014-06-27.
7. Foucher P.Y., Chedin A., Armante R., Boone C., Crevoisier C., Bernath P. Carbon dioxide atmospheric vertical profiles retrieved from space observation using ACE-FTC solar occultation instrument // Atmos. Chem. Phys. – 2011. – P. 2455–2470.
8. Heimann M., Esser G., Haxeltine A. et al. Evaluation of terrestrial carbon cycle models through simulations of the seasonal cycle of atmospheric CO<sub>2</sub>: First results of a model intercomparison study // Global Biogeochemical cycles. – 1998. – Vol. 12, No. 1. – P. 1–24.
9. Fung I., Prentice K., Matthews E. et al. Three-Dimensional Tracer Model Study of Atmospheric CO<sub>2</sub>: Response to Seasonal Exchanges With Terrestrial Biosphere // J. Geophys. Res. – 1983. – Vol. 88, No. C2. – P. 1281–1294.

10. Myhre, G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2013. – P. 659–740.

11. Saito R., Houweling S., Patra P., Belikov D., Lokupitiya R., Niwa Y., Chevallier F., Saeki T., Maksyutov S. TransCom satellite intercomparison experiment construction of a bias corrected atmospheric CO<sub>2</sub> climatology // *J. Geophys. Res.* – 2011. – Vol. 116. – D21120. – doi:10.1029/2011JD016033.

12. Shim C., Nassar R., Kim J. Comparison of Model-simulated Atmospheric Carbon Dioxide with GOSAT Retrievals // *Asian Journal of Atmospheric Environment.* – 2011. – Vol. 5. – P. 263–277.

13. Vasala V., Maksyutov S. Simulation and assimilation of global ocean pCO<sub>2</sub> and air-sea CO<sub>2</sub> fluxes using ship observations of surface ocean pCO<sub>2</sub> in a simplified biogeochemical offline model // *Tellus B.* – 2010. – Vol. 62. – P. 821–840.

*Поступила в редакцию 27.07.2015 г.*