

Углеродный цикл в модели климата ИВМ РАН. Тезисы доклада в ИГКЭ 26.05.2021

Володин Е.М. Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН.

Введение

Ожидаемые в ближайшие десятилетия изменения климата связаны в первую очередь с ростом концентрации парниковых газов. Наибольший рост парникового эффекта связан с антропогенными выбросами углекислого газа, поэтому расчет его концентрации в атмосфере весьма важен для моделирования ожидаемых изменений климата. Стандартный подход к такому моделированию состоит в том, что, помимо концентрации CO_2 в атмосфере, моделируется содержание углерода в растениях, почве, а также в океане. Здесь рассмотрим, каким образом эволюция углерода в этих пулах учтена в модели климата ИВМ РАН.

Модель углеродного цикла в климатической модели.

Итак, для оценки концентрации CO_2 в атмосфере нужно решать эволюционные уравнения для углерода растений, почвы и океана, а также вычислять потоки, посредством которых эти пулы обмениваются углеродом с атмосферой. Для углерода атмосферы решается следующее уравнение:

$$\frac{\partial C_{ATM}}{\partial t} = F_{EMIS} + F_{DFR} + F_{ERS} + R_S + F_{PLR} - F_{PSN} - F_{OC}$$

Здесь C_{ATM} - суммарное количество углерода в атмосфере, F_{EMIS} - антропогенный поток в атмосферу вследствие сжигания ископаемого топлива, F_{DFR} - поток вследствие сведения лесов, F_{ERS} - поток вследствие антропогенной эрозии почв, R_S - поток вследствие разложения органики почвы, F_{PLR} - поток вследствие дыхания растений, F_{PSN} - поток вследствие фотосинтеза растений, F_{OC} - поток углерода из атмосферы в океан. Может моделироваться как суммарное содержание углерода в атмосфере, так и трехмерное. В последнем случае в уравнение добавляется слагаемое адвекции. Для расчета потоков из почвы и растений используется параметризации, применяемые в модели поверхности LSM-1.0 (Land Surface Model, version 1.0, Bonan 1996). Для этого в каждой модельной ячейке, приходящейся на сушу, задается максимальная доля, покрытая определенным типом растительности. Рассматриваются следующие типы растительности: тропический лес, саванна, широколиственный лес, смешанный лес, хвойный лес, трава, кусты, возделываемые культуры. Действительное покрытие данным типом растительности каждой ячейки зависит, кроме заданного максимального покрытия, от влажности почвы в модели. Для каждого типа растительности задается максимальный листовой индекс, а текущий листовой индекс зависит, кроме этого, от температуры воздуха в предшествующие дни, и от влажности почвы. Эволюция углерода данного вида растений C_{VEG} и почвы C_{SOIL} вычисляется согласно формулам

$$\partial C_{VEG} / \partial t = F_{PSN} - F_{PLR} - C_{VEG} / \tau_{VEG} - F_{DFR},$$

$$\partial C_{SOIL} / \partial t = C_{VEG} / \tau_{VEG} - R_S - F_{ERS},$$

Здесь F_{PSN} вычисляется по эмпирической формуле:

$$F_{PSN} = f(T_{ATM})f(W_{SOIL})f(RAD)f(Q_{ATM})f(CO_2)$$

где T_v и Q_v - температура и удельная влажность приземного воздуха, W_{SOIL} - количество влаги в корневой зоне, RAD - фотосинтетически активная солнечная радиация.

Для примера приведем выражение для $f(T_v)$.

$$f(T_v) = \left[1 + \exp \left(\frac{-220000 + 710(T_v + 273.16)}{8.314(T_v + 273.16)} \right) \right]^{-1}$$

Схема потоков углерода для наземной экосистемы приведена на рис.1. Зависимость сомножителей в формуле для фотосинтеза от параметров приведена на рис.2.

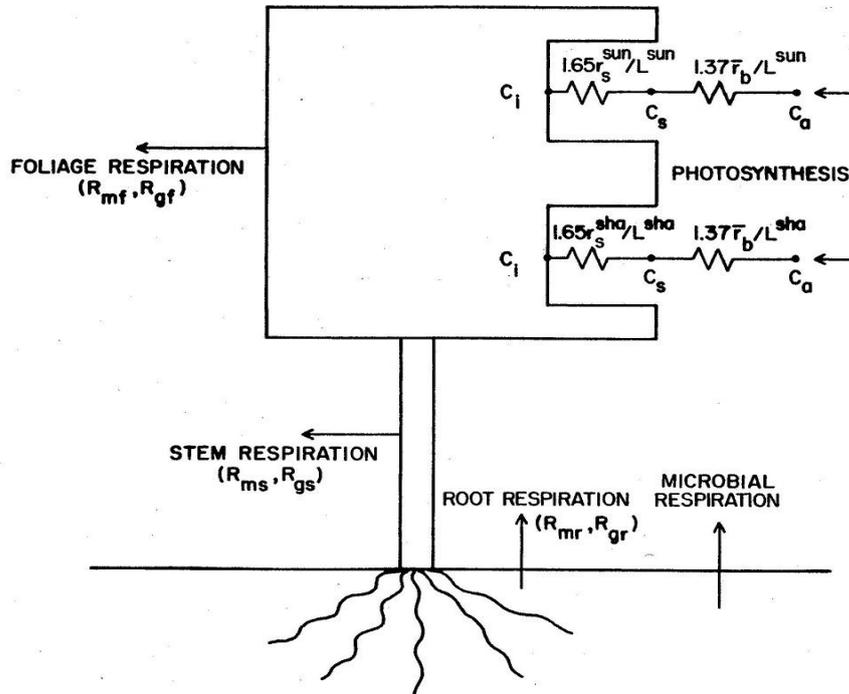


Рис.1. Схема потоков углерода в наземной экосистеме из Bonan (1996).

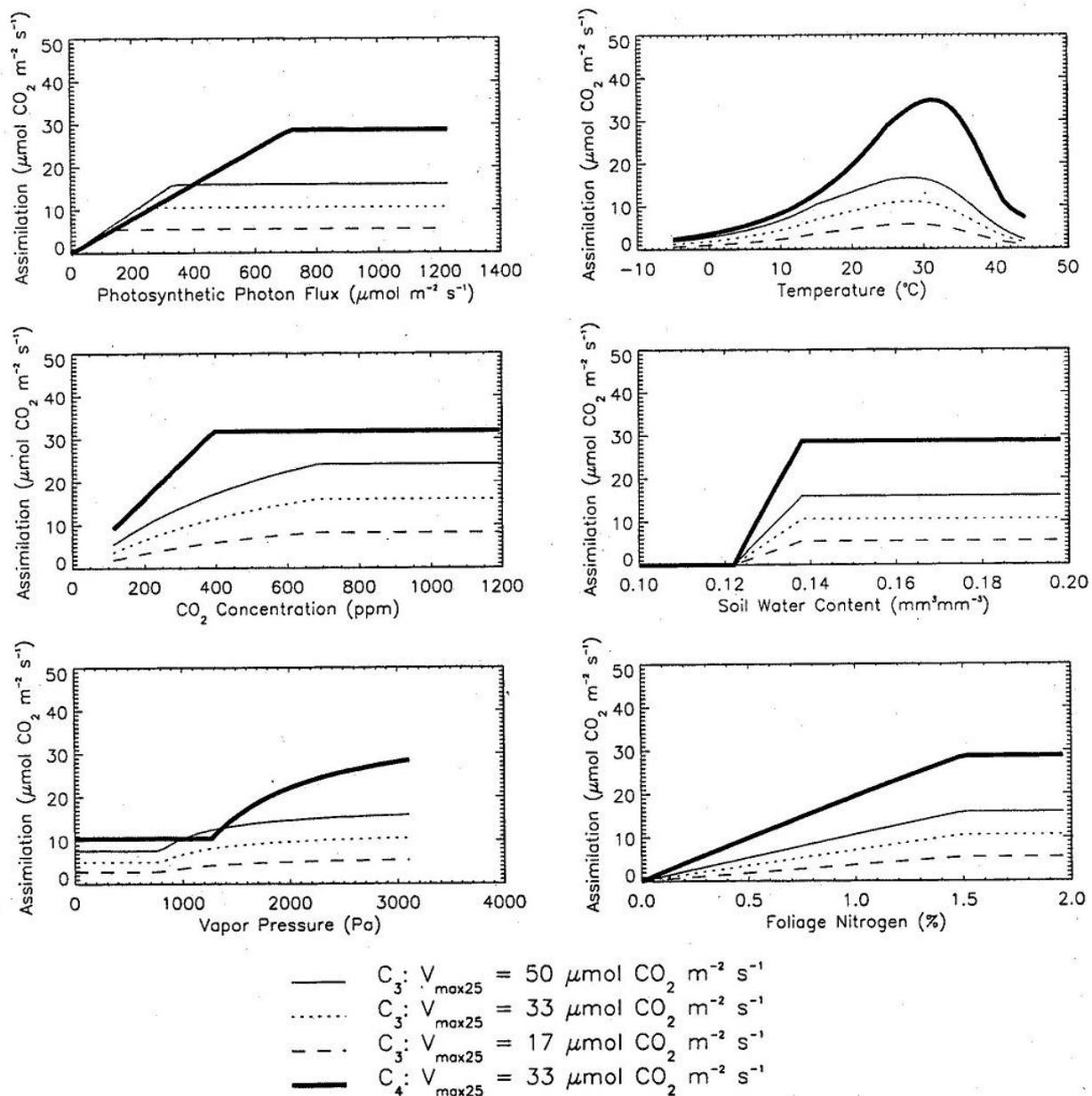


Рис.2. Зависимость сомножителей в формуле для фотосинтеза от параметров. Из Bonan (1996).

Скорость дыхания растений состоит из поддерживающего дыхания R_m и дыхания роста R_g : $F_{PLR} = R_m + R_g$, где

$$R_m = [L R_{f25} f(N) \beta_t + V_b^s R_{s25} + V_b^r R_{r25}] a_{rm}^{\frac{T_p - 25}{10}}$$

$$R_g = 0.25(A^{\text{sun}} L^{\text{sun}} + A^{\text{sha}} L^{\text{sha}})$$

Здесь L - листовой индекс, R_{f25} R_{s25} R_{r25} - дыхание листьев, стволов и корней при 25С, V_b^s - масса углерода стволов, V_b^r - масса углерода корней.

Дыхание почвы вычисляется по формуле

$$R_s = \frac{\bar{\theta}}{a_1 + \bar{\theta}} \frac{a_2}{a_2 + \bar{\theta}} a_3 S_c a_4^{\frac{T_s - 10}{10}}$$

где T_s - температура почвы, θ - количество влаги в почве, S_c - углерод почвы, a_1 - a_4 параметры.

Для углерода в океане C_{OC} решается уравнение

$$\partial C_{OC} / \partial t = A + VD + HD + BGC$$

где A , VD , HD , BGC - слагаемые, описывающие адвекцию, вертикальную диффузию, а также вклад биохимии океана. На нижней границе ставится условие нулевого потока, на верхней поток углерода из атмосферы в океан F_{OC} вычисляется по следующей формуле:

$$F_{OC} = \rho (P_{ATM} - P_{OC}) * C / |V_{ATM}|$$

Здесь ρ - плотность воздуха, P_{ATM} и P_{OC} - давление углекислого газа в атмосфере и в океане, C - размерный множитель, зависящий от безразмерного к-та обмена и числа Шмидта, $|V_{ATM}|$ - модуль скорости приземного ветра. Давление углекислого газа в океане рассчитывается следующим образом:

$$P_{OC} = C_{CO2} * C_{HCO3}^{**2} / C_{CO3} \quad \text{где}$$

$$C_{CO2} = 0.035 + 0.0019 * (T_{OC} - 5.0),$$

$$C_{HCO3} = (C_{OC} - \text{SQRT}(C_{OC} * C_{OC} - AS * (2 * C_{OC} - AS) * (1 - 4 * CCORB))) / (1 - 4 * CCORB),$$

$$C_{CO3} = (AS - C_{HCO3}) / 2,$$

$$CCORB = 0.000575 + 0.000006 * (T_{OC} - 5.0), \quad AS = 2.22$$

Здесь T_{OC} - температура океанской воды (С).

Результаты

Модель углеродного цикла была включена в модель климатической системы INMCM3 (Володин 2007), INMCM4, INM-CM4-8.

Приведем некоторые результаты воспроизведения современного состояния углеродного цикла и его вероятные изменения в будущем.

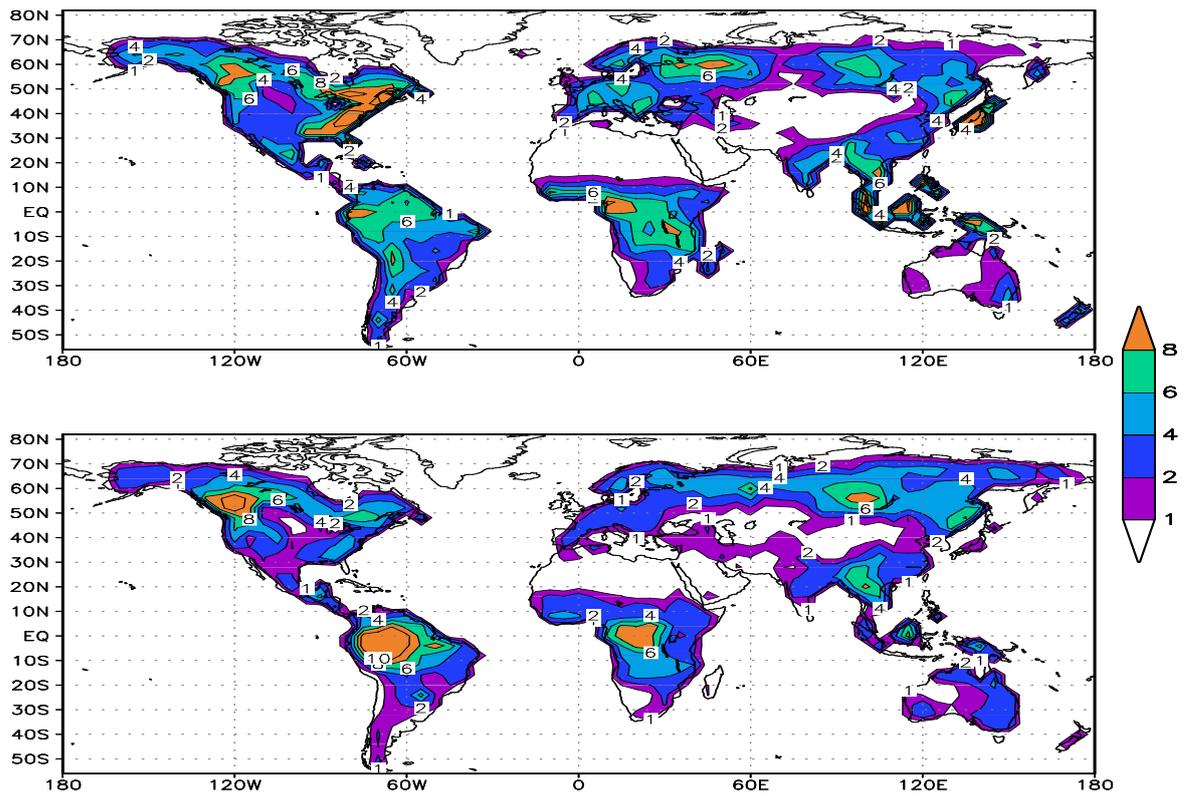


Рис.3. Углерод растений (кг/м²) по данным модели вверху и Olson (1985) внизу.

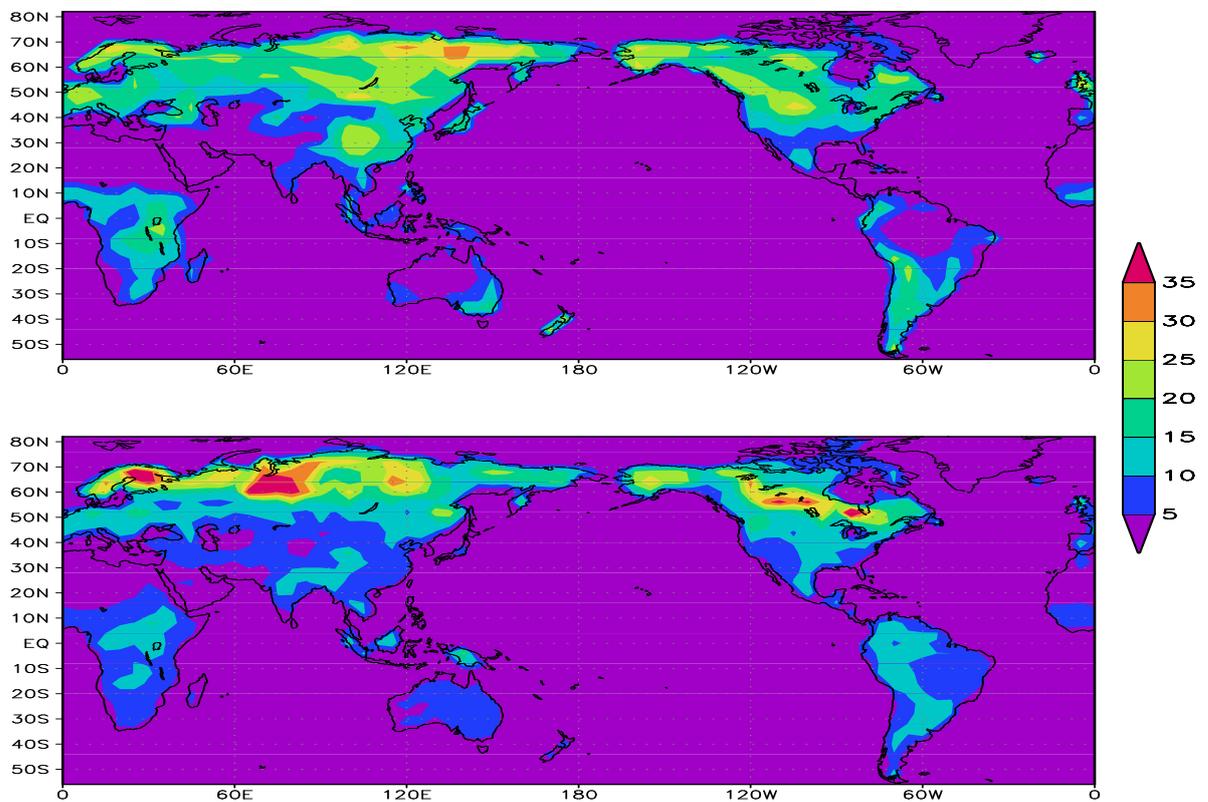


Рис.4. Углерод почвы (кг/м²) по данным модели вверху и Zinke (1984) внизу.

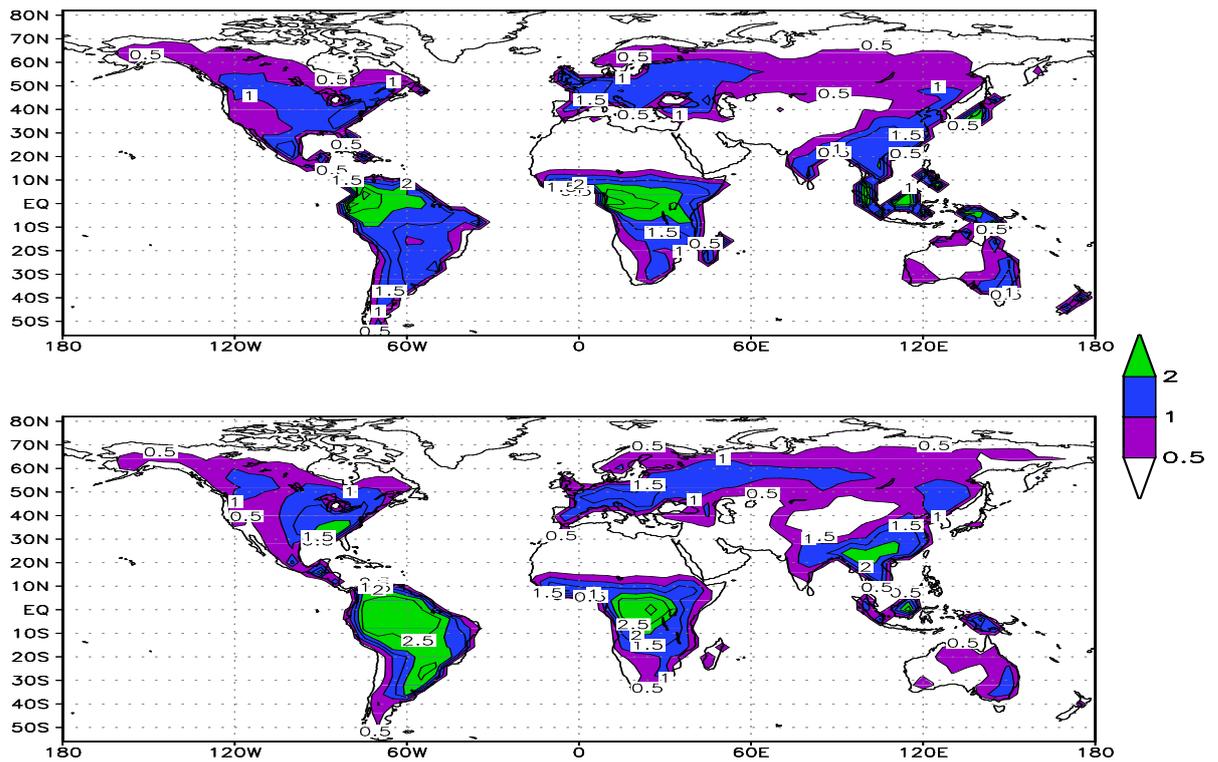


Рис.5. Первичная продукция, микромоль/(м² с) в модели (вверху) и оценка по наблюдениям (внизу)

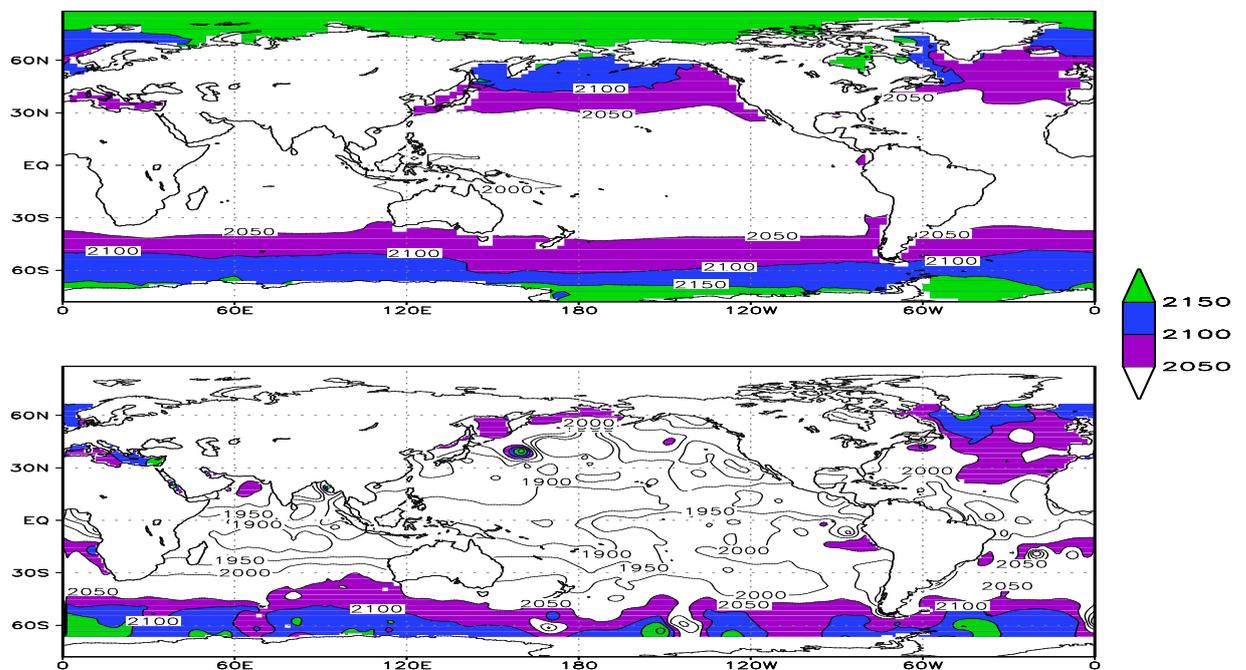


Рис.6. Углерод в океане на поверхности (10^3 моль/м³), модель (вверху) и наблюдения Goyet et al. 2000 (внизу).

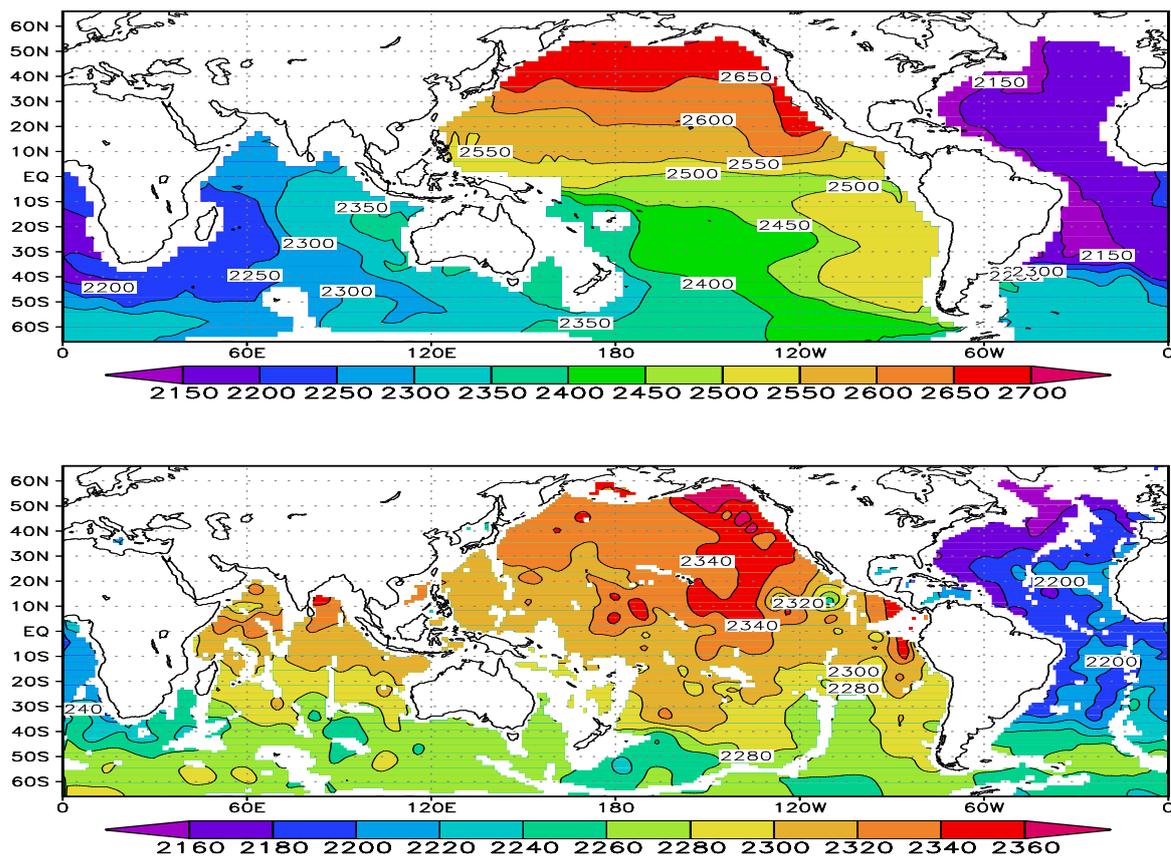


Рис.7. Углерод в океане на глубине 3000м (10^{-3} моль/м³), модель (вверху) и наблюдения (внизу).

На рис.3 и 4 приведено распределение углерода растений и почвы по данным модели, и оценка по наблюдениям. На рис.5 представлена первичная продукция (фотосинтез минус дыхание) по данным модели и оценка по данным наблюдений. На рис.6 и 7 приведено содержание углерода в океане на поверхности и на глубине 3000м. Для всех приведенных полей можно видеть неплохое соответствие модельных данных имеющимся наблюдениям.

На рис.8 представлен среднеклиматический годовой ход приземной концентрации CO_2 по данным модели и наблюдений для различных точек. Можно видеть, что модель в основном правильно воспроизводит амплитуду годового хода. Однако, в континентальных районах умеренных широт минимум достигается на 1-2 месяца раньше, что говорит о более раннем максимуме фотосинтеза в модели по сравнению с природой.

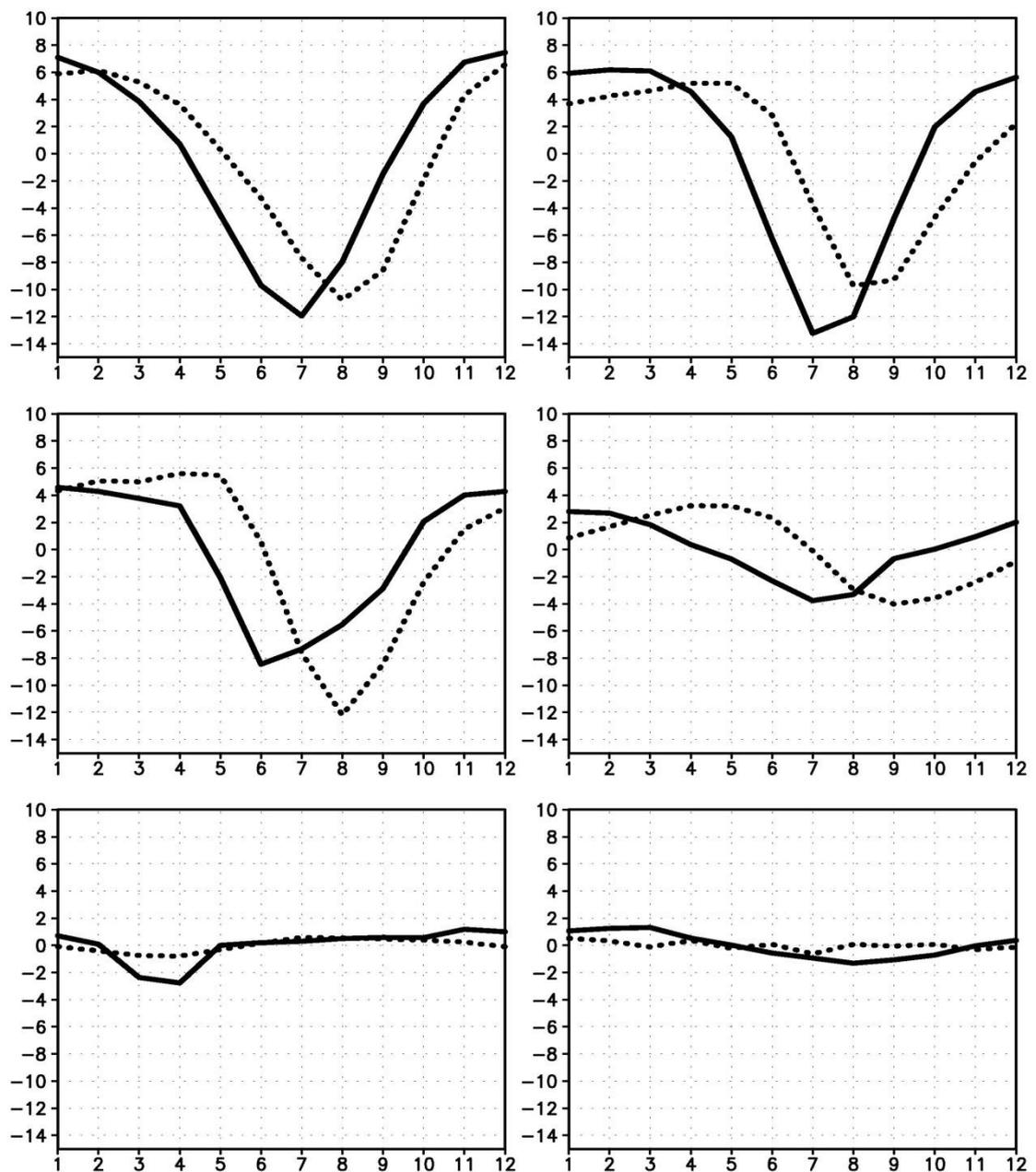


Рис.8. Годовой ход приземной концентрации CO₂ в атмосфере (млн⁻¹) по данным модели (сплошная линия) и наблюдений [6] (пунктирная линия). А – Балтийское море (55,4⁰с.ш., 17,1⁰в.д.); Б – Канада, Алерт (82,4⁰с.ш., 62,5⁰з.д.); В – Алеутские о-ва (52,7⁰с.ш., 174,1⁰в.д.); Г – Виргинские о-ва (17,7⁰с.ш., 64,7⁰з.д.); Д – о-в Асеншн (7,9⁰ю.ш., 14,4⁰з.д.); Е – О-в Пасхи (27,2⁰ю.ш., 109,4⁰з.д.). Из данных вычтен средний тренд. По оси абсцисс указаны номера месяцев.

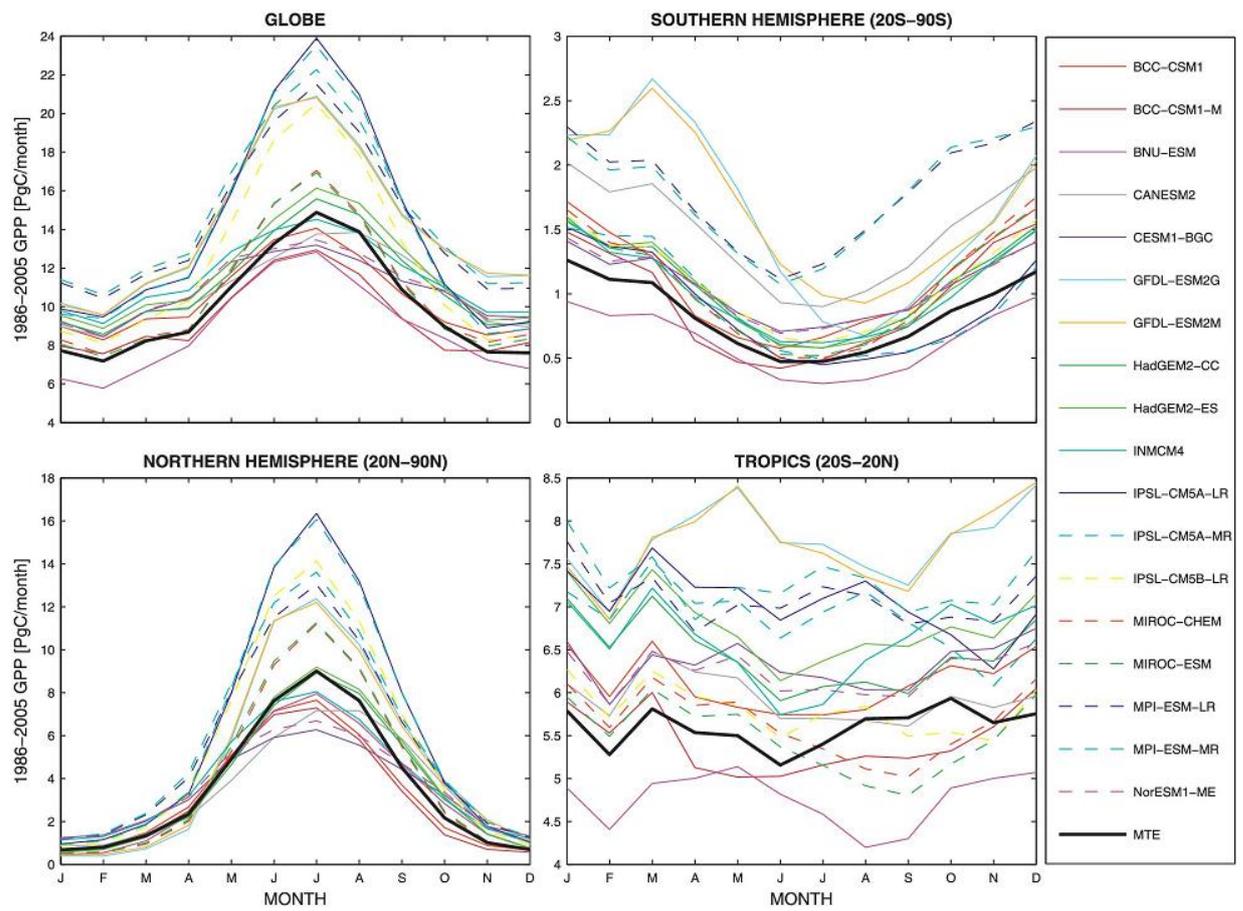


Рис.9. Среднеклиматический годовой ход продукции роста по данным моделей С4МIP. Anav et al. (2013)

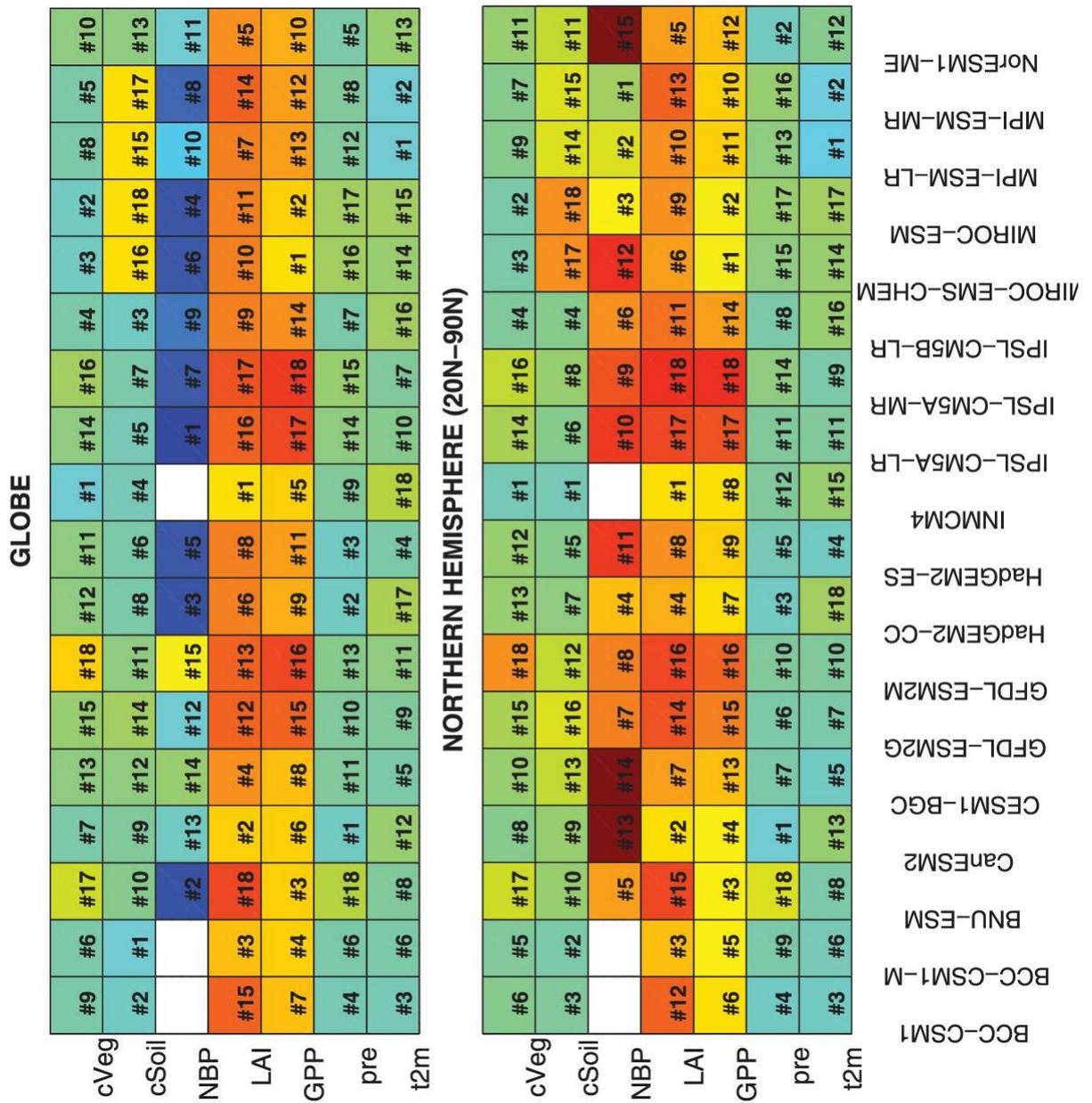


Рис.10. Ошибка воспроизведения параметров углеродного цикла в моделях С4МIP. Рисунок из Anav et al. (2013).

Сравнительный анализ воспроизведения некоторых параметров углеродного цикла в моделях С4МIP представлено на рис.9 и 10.

С моделью проведен численный эксперимент по воспроизведению изменений климата и углеродного цикла в 1850-2100г. На рис. 11 представлен сценарий антропогенной эмиссии CO₂ и концентрации CO₂ в атмосфере.

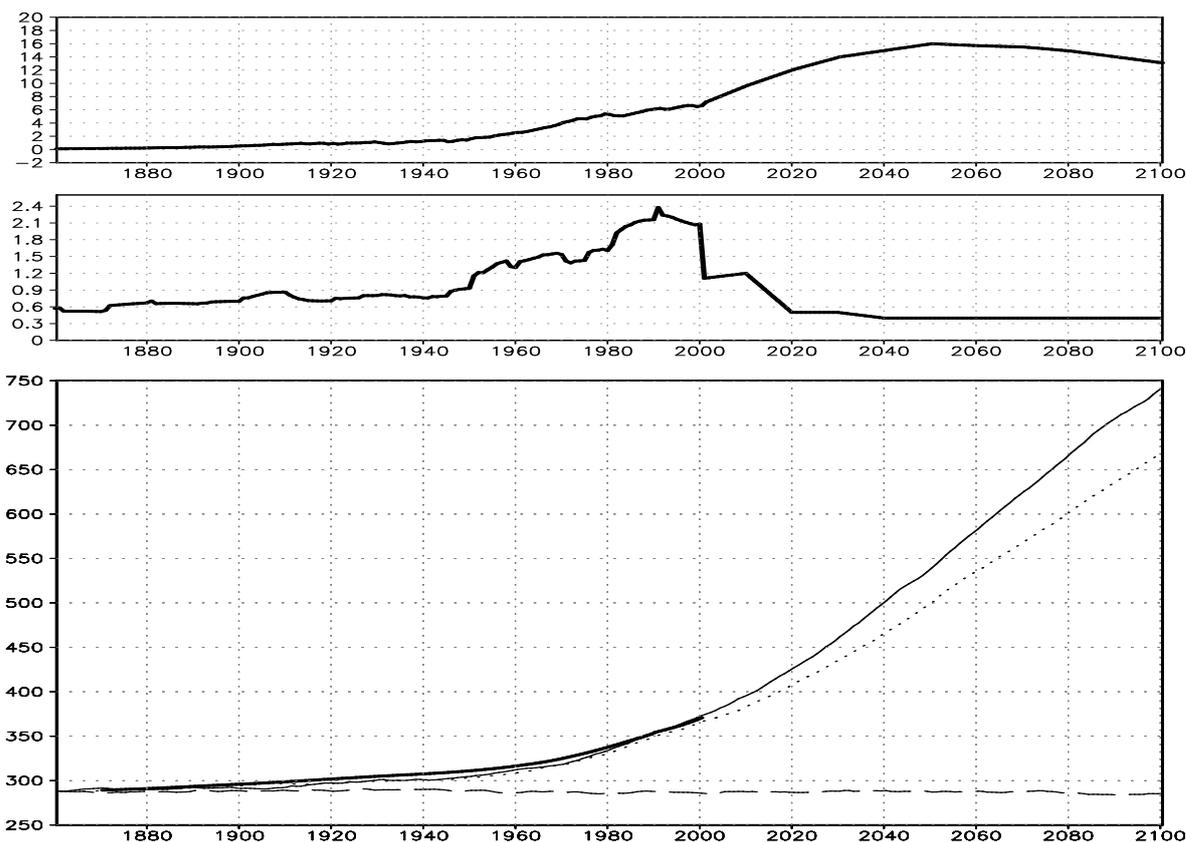


Рис.11. Вверху - антропогенные эмиссии CO_2 (ГтС в год) вследствие сжигания топлива. В середине - антропогенные эмиссии CO_2 вследствие сведения лесов и эрозии почвы. Внизу - концентрация CO_2 в атмосфере по данным модели (тонкая сплошная линия), наблюдений (толстая линия), преиндустриального эксперимента (штриховая линия) и эксперимента, где не учитывается обратная связь между климатом и углеродным циклом (пунктирная линия).

В Табл.1 представлены доли антропогенных выбросов, оставшихся в атмосфере, а также поглощенные экосистемами суши и океаном по разным моделям с углеродным циклом. В скобках показаны числа для эксперимента без обратной между углеродным циклом и климатом.

Таблица 1. Доля антропогенных выбросов, поглощенных атмосферой, сушей и океаном. Данные Friedlingstein et al. (2006)

Доля поглощенного углерода %

Модель	атмосфера	суша	океан	F
NadCM3LC	72(49)	5(30)	24(20)	1.47
IPSL-CM2C	47(40)	22(30)	32(30)	1.17
NCAR-CSM1	54(52)	25(26)	21(22)	1.04
MPI	54(46)	22(30)	24(24)	1.17
LLNL	41(36)	44(49)	15(15)	1.14
FRCGC	63(60)	10(10)	27(30)	1.05
UMD	64(55)	1(6)	35(39)	1.16
UVic-2.7	59(48)	17(28)	23(26)	1.23
CLIMBER	58(52)	22(27)	20(21)	1.12
BERN-CC	48(42)	26(32)	26(26)	1.14
INM	58(49)	20(31)	22(20)	1.19
Среднее	56±8(48±7)	19±11(27±11)	25±5(25±6)	1.17±0.11

На рис.12 представлено изменение содержания углерода в растениях и почве в конце 21 века по сравнению с концом 20 века. На рис.13 представлено изменение первичной продукции и содержания углерода в океане.

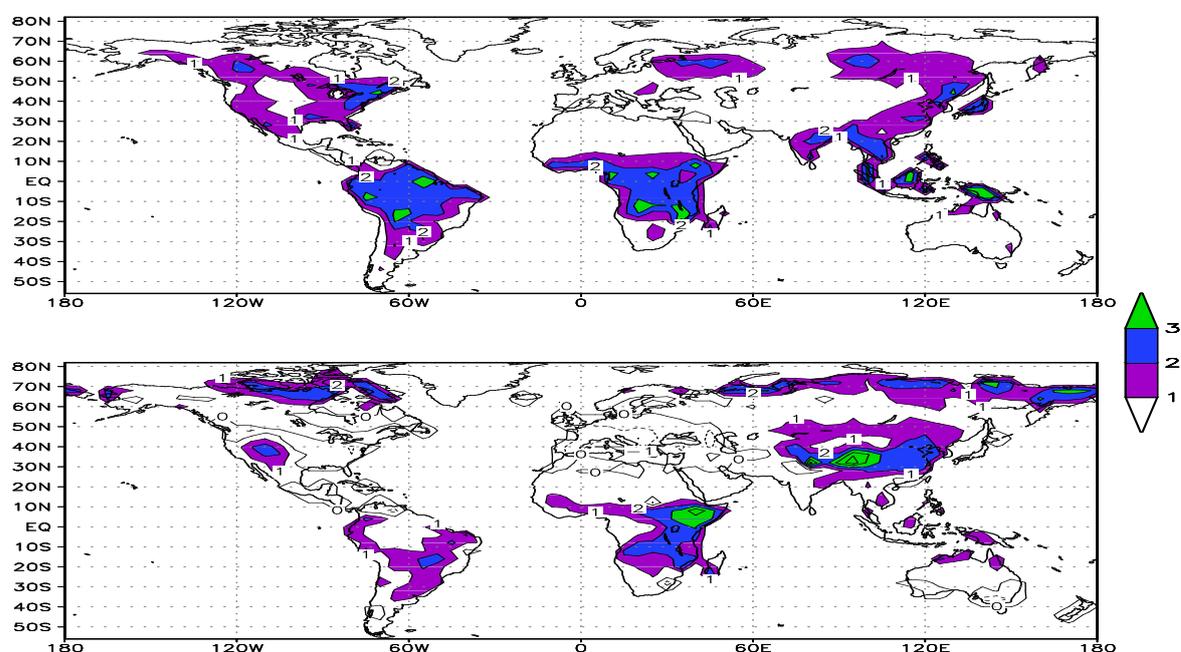


Рис.12. Изменение углерода растений (вверху) и почвы (внизу) в конце 21 века по сравнению с концом 20 века в модели INM. Размерность - кг/м²

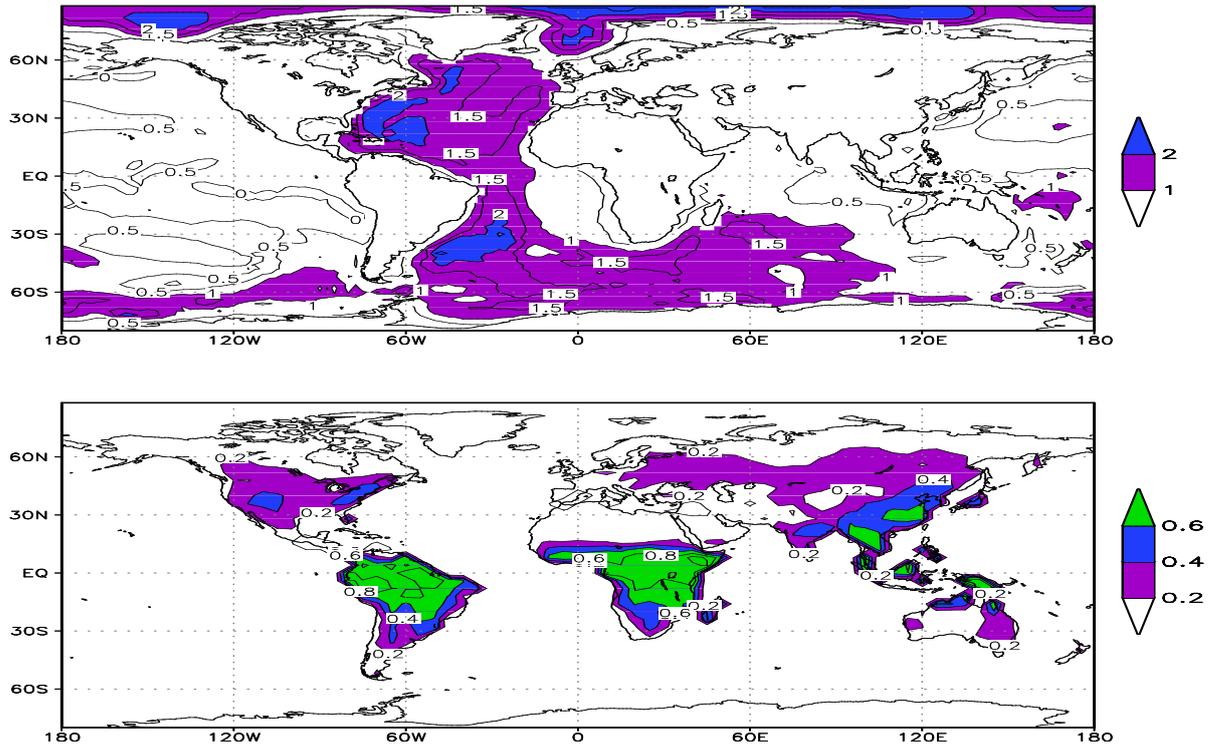


Рис.13. Изменение углерода океана, kg/m^2 (вверху) и первичной продукции, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{c})$.

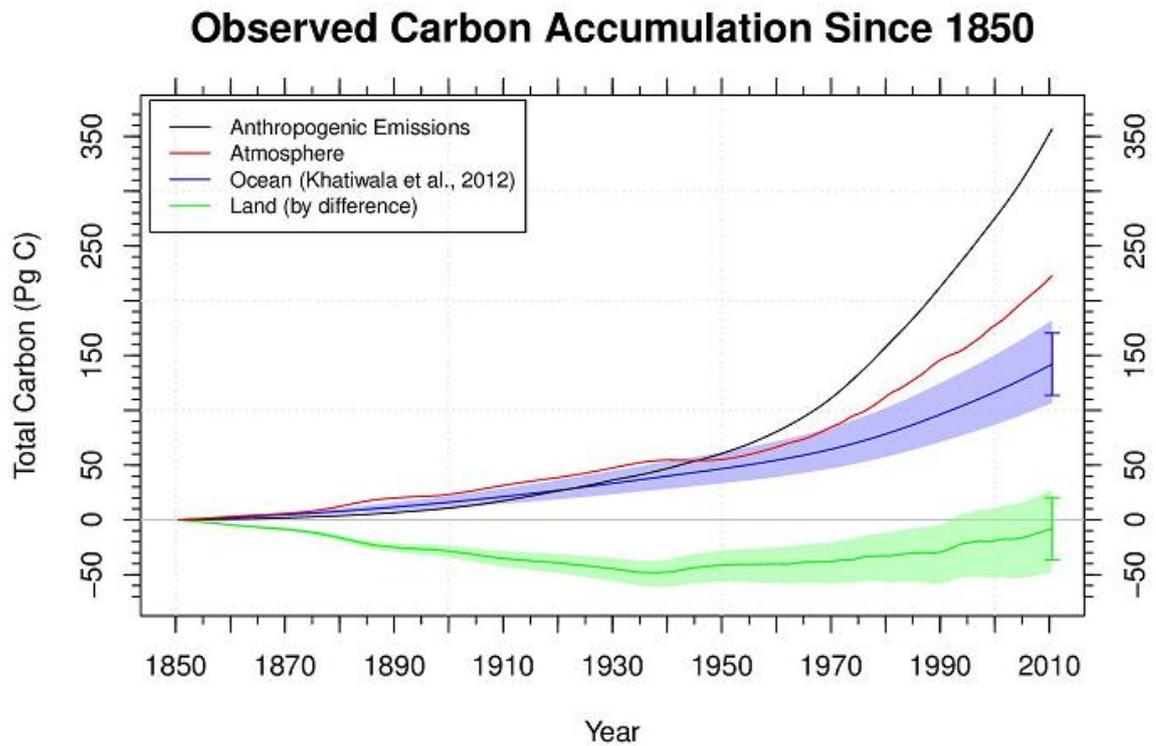


Рис.14. Изменение содержания углерода в атмосфере, экосистемах суши и океана в 1850-2010г. Рисунок из Hoffmann et al. (2014)

ESM Historical Atmospheric CO₂ Mole Fraction

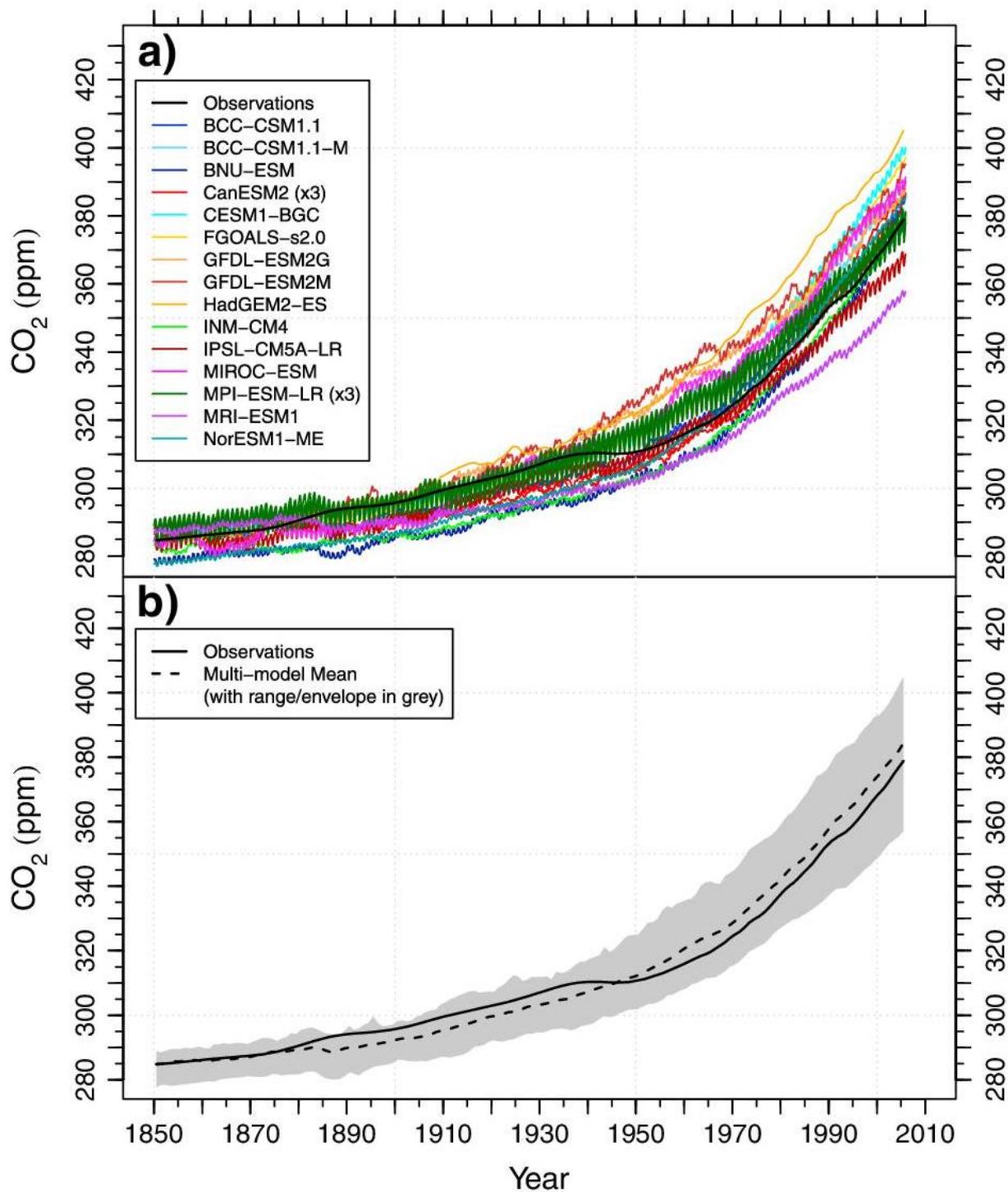


Рис.15. Концентрация CO₂ в атмосфере по данным наблюдений (сплошная черная кривая) и моделей (цветные кривые). Рисунок из Hoffmann et al (2014)

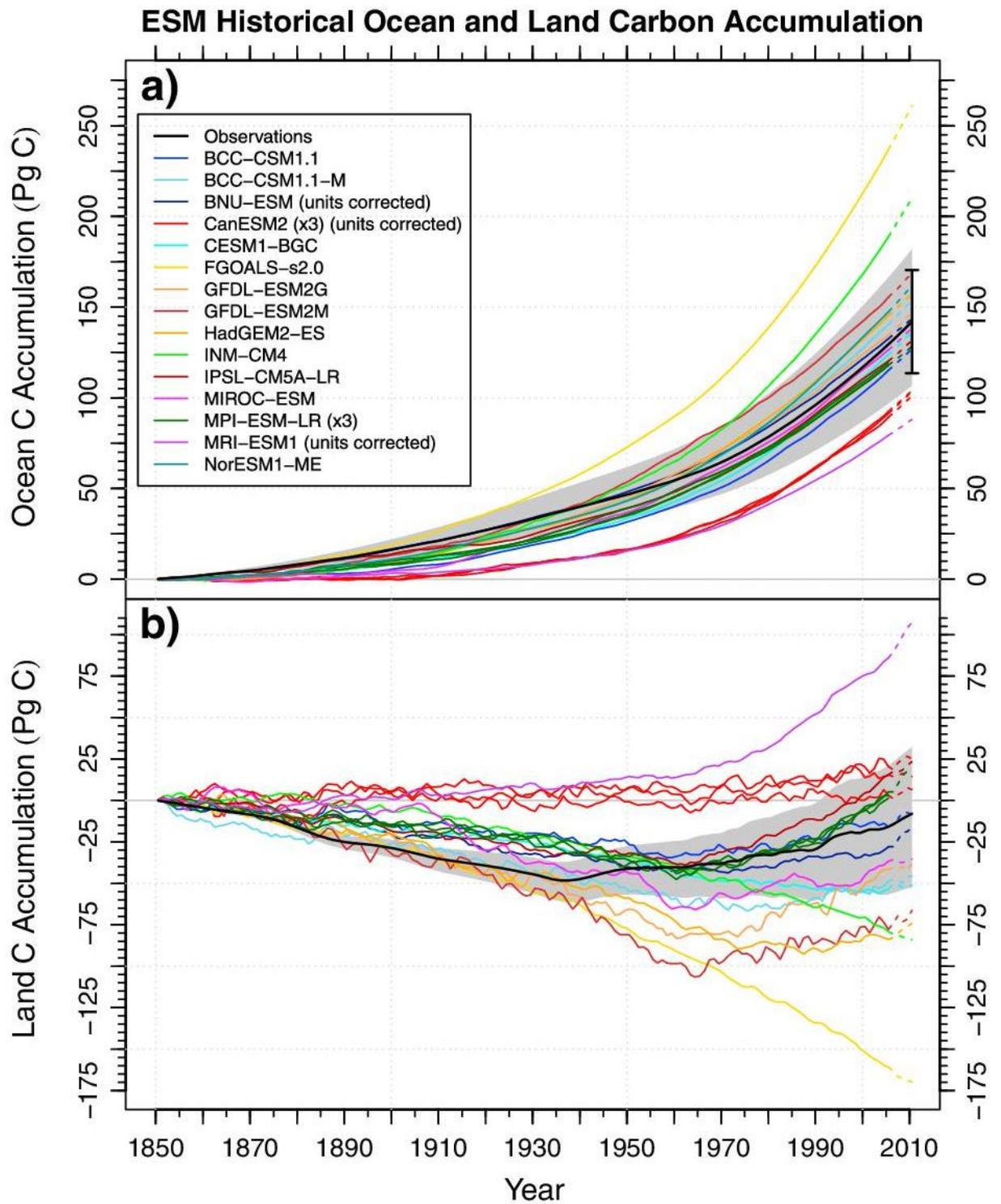


Рис.16. Изменение содержания углерода в океане и экосистемах суши для моделей CMIP5. Рисунок из Hoffmann et al. (2014)

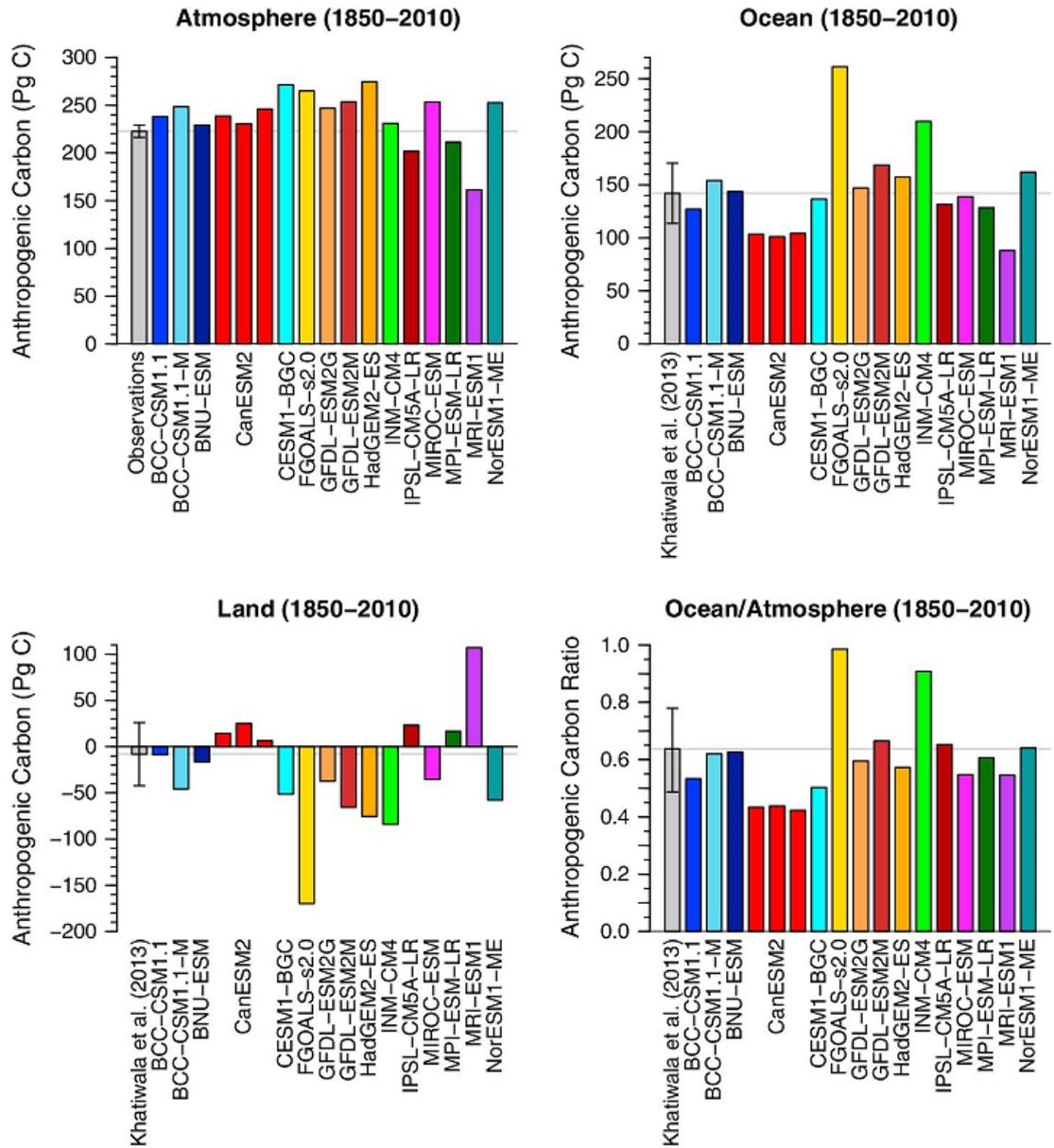


Рис.17. Накопление углерода в атмосфере, океане и суше в 1850-2010 по наблюдениям и моделям. Рисунок из Hoffmann et al. (2014)

ESM RCP 8.5 Atmospheric CO₂ Mole Fraction

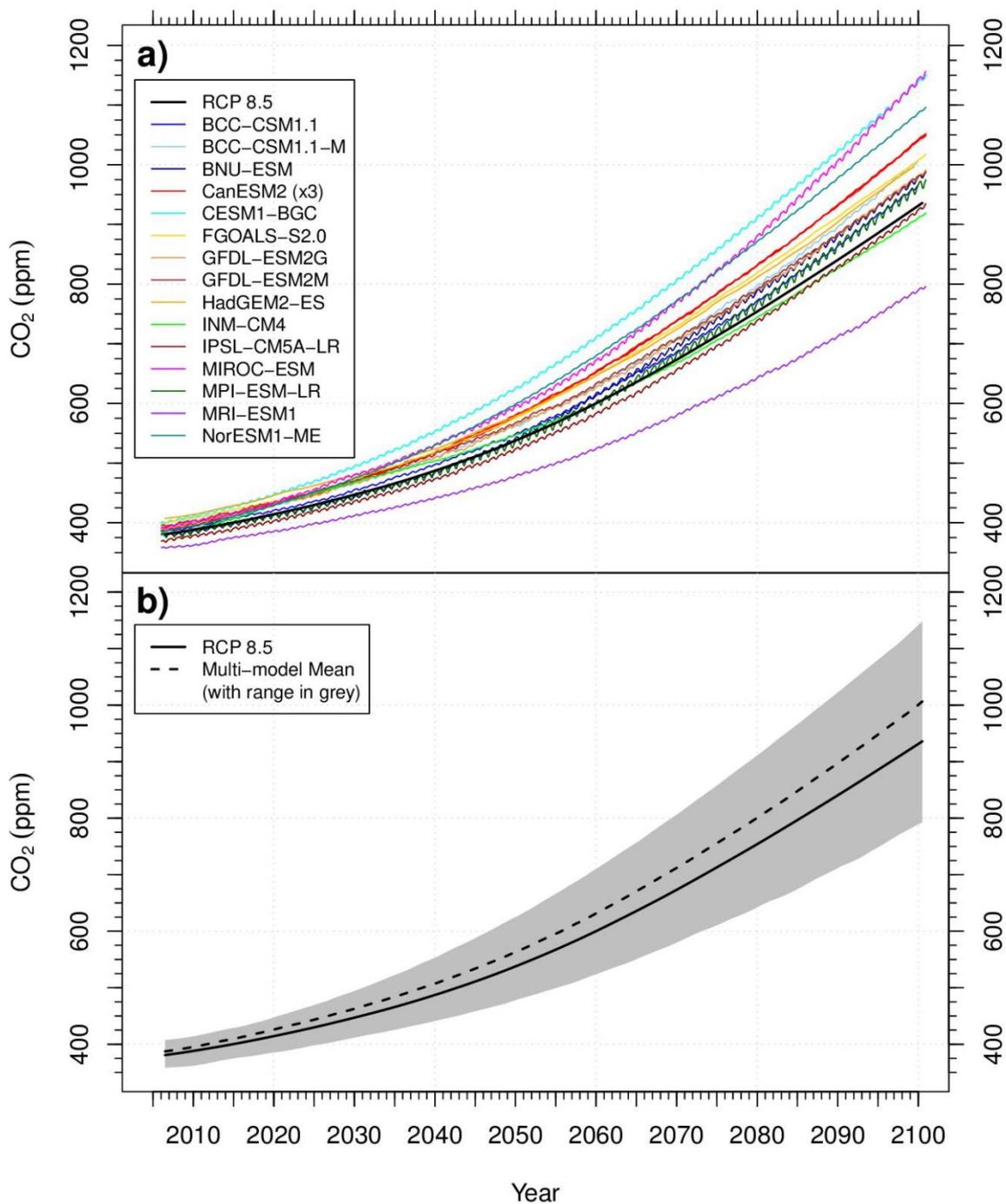


Рис.18. Концентрация CO₂ в 2006-2100г по различным моделям при сценарии RCP8.5. Рисунок из Hoffmann et al. (2014).

Эксперименты по воспроизведению изменений климата и углеродного цикла были проведены и в рамках программы CMIP5. Для 2006-2100г использовался сценарий RCP8.5. На рис. 14 изображены суммарные антропогенные эмиссии углерода, а также изменение содержания антропогенного углерода в атмосфере, растениях и почве и океане. На рис.15 представлена концентрация CO₂ в 1850-2010г по данным моделей. На рис.16 представлено накопление углерода океаном и сушей. На рис.17 эти данные суммированы за 1850-2010г. На рис.18 изображен прогноз концентрации CO₂ до 2100г по разным моделям углеродного цикла.

Литература

Володин Е.М. Модель общей циркуляции атмосферы и океана с углеродным циклом. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2007, Т.43, N2, с.1-16.

Anav, A., Friedlingstein, P., Kidston, M., Bopp, L., Ciais, P., Cox, P., Jones, C., Jung, M., Myneni, R., & Zhu, Z. (2013). Evaluating the Land and Ocean Components of the Global Carbon Cycle in the CMIP5 Earth System Models, *Journal of Climate*, 26(18), 6801-6843.

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. 1996. NCAR, Boulder, Colorado. 156 p.

Friedlingstein P., Cox P., Betts R. et al. Climate – carbon cycle feedback analysis, results from the C4MIP model intercomparison // *J. Climate*. 2006. V. 19. P. 3337–3553.

Hoffman, F. M., Randerson, J. T., Arora, V. K., Bao, Q., Cadule, P., Ji, D., Jones, C. D., Kawamiya, M., Khatiwala, S., Lindsay, K., Obata, A., Shevliakova, E., Six, K. D., Tjiputra, J. F., Volodin, E. M., and Wu, T. (2014), Causes and implications of persistent atmospheric carbon dioxide biases in Earth System Models, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 119, 141– 162.

Goyet C., Healy R., Ryan J. Global distribution of total inorganic carbon and total alkalinity below the deepest winter mixed layer depths // ORNL/CDIAC-127, NDP-076, Carbon Dioxide Information Analysis Center. 2000. Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA.

Olson J.S., Watts J.A., Allison L.J. Major world ecosystem complexes ranked by carbon in live vegetation: a database. Oak Ridge National Laboratory. Environ Sciences Division, Oak Ridge, NDP-017, 1985.

Zinke P.J., Stangenberger A.G., Post W.M. et al. World-wide organic soil carbon and nitrogen data. Carbon Dioxide Information Analysis Center, 1984, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA.