

УДК 551.583.001.572

СВЯЗЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КЛИМАТА И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ КЛИМАТА ИВМ РАН К УВЕЛИЧЕНИЮ КОНЦЕНТРАЦИИ CO₂¹

© 2021 г. Е. М. Володин*

Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, ул. Губкина, 8, Москва, 119333 Россия

**e-mail: volodinev@gmail.com*

Поступила в редакцию 07.04.2021 г.

После доработки 16.04.2021 г.

Принята к публикации 09.06.2021 г.

Рассматривается величина естественных колебаний климата в различных версиях климатической модели ИВМ РАН, имеющих разную чувствительность к увеличению концентрации CO₂. Показано, что среднеквадратичное отклонение глобальной температуры поверхности в версии с равновесной чувствительностью к учетверению концентрации CO₂ равной 3.6 и 7.6 К примерно одинаковы. Увеличения амплитуды естественных колебаний при увеличении чувствительности не происходит как для глобально осредненных величин, так и для региональных естественных колебаний. Однако некоторое увеличение амплитуды естественных колебаний климата в Тихом океане, в том числе связанных с Эль-Ниньо и Тихоокеанским декадным колебанием, происходит при изменении траектории генерации облачности атмосферного пограничного слоя. Равновесная чувствительность при этом меняется мало.

Ключевые слова: модель, климат, чувствительность, изменчивость, амплитуда

DOI: 10.31857/S000235152105014X

ВВЕДЕНИЕ

Различие в величине равновесной чувствительности климатических моделей к увеличению концентрации CO₂ в атмосфере является одной из ключевых проблем в современной науке о климате. Для моделей CMIP5 (Coupled Model Intercomparison project, Phase 5) равновесная чувствительность к учетверению концентрации CO₂ составляла от 4.2 до 9.4 град [1]. Для моделей CMIP6 диапазон неопределенности увеличился и составил 3.6–11.2 К [2].

По данным [3], среднеквадратичное отклонение линейных трендов за 10 лет в доиндустриальном эксперименте и равновесная чувствительность моделей CMIP5 тесно связаны друг с другом, коэффициент корреляции между ними составляет 0.86.

Модели с более высокой чувствительностью имеют и большую изменчивость 10-летних трендов глобальной температуры не только в доиндустриальном эксперименте, где воздействия на климатическую систему неизменны во времени, но и в историческом эксперименте, где заданы реально

наблюдавшиеся изменения воздействий в 1850–2014 гг. Вероятная причина такой зависимости показана на простой модели в [4]. Предполагая такую зависимость и считая изменчивость наблюдаемой глобально осредненной температуры известной, в [4] была оценена равновесная чувствительность реальной климатической системы к учетверению концентрации CO₂, которая, согласно этой работе, получилась равной 4.4–6.8 К с вероятностью 66%.

Согласно [5], имеются несколько версий модели климата ИВМ РАН, отличающиеся равновесной чувствительностью более чем в два раза, при том они отличаются только параметризацией облачности, остальные блоки модели полностью идентичны. Поэтому было бы интересно проверить, укладываются ли данные этих версий модели в общую закономерность, и соответствует ли большая равновесная чувствительность большей естественной изменчивости.

МОДЕЛЬ, ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ДИАГНОСТИКА ЕСТЕСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КЛИМАТА

Для численных экспериментов использовалась модель климата INM-CM4-8. Модель состо-

¹ Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на Всероссийской конференции “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти акад. А.М. Обухова (Москва, 10–12 ноября 2020 г.).

Таблица 1. Среднеквадратичное отклонение глобально осредненной температуры (К) и ее 10-летнего тренда (К/10 лет) для трех версий модели. Указана также равновесная чувствительность ΔT_{EQ} (К) каждой версии модели.

Время осреднения	Версия 1	Версия 2	Версия 3
Среднее за 1 год	0.089	0.082	0.099
Среднее за 5 лет	0.074	0.067	0.068
Среднее за 10 лет	0.068	0.061	0.051
Тренд за 10 лет	0.106	0.107	0.139
ΔT_{EQ}	1.8	3.8	3.5

ит из блока динамики атмосферы и аэрозольного блока с разрешением 2×1.5 град по долготе и широте и 21 уровней по вертикали, и блока океана с разрешением 1×0.5 град и 40 уровней. Устройство модели и воспроизведение ею современного климата описаны в [6]. Анализируются данные трех версий модели. Первая в точности соответствует [6], именно эта версия участвовала в экспериментах SMIP6. Вторая версия отличается от первой тем, что вместо диагностической схемы расчета доли и водности облачности типа Смагоринского используется прогностическая схема типа [7]. Вторая версия тождественна модели 2, описанной в [5]. Третья версия модели отличается от второй только трактовкой образования облачности атмосферного пограничного слоя (см. формулу (4) из [5]). Если в версии 2 считалось, что высота атмосферного пограничного слоя (АПС) и, следовательно, верхняя граница облачности АПС рассчитывается без учета выделения скрытого тепла при конденсации, то в версии 3 считается, что верхняя граница облачности АПС определяется из условия влажной неустойчивости. Это приводит к меньшему количеству нижней облачности в районах глубокой конвекции и, как следствие, к увеличению разности температур между западом и востоком тропического Тихого океана.

Равновесная чувствительность к учетверению концентрации CO_2 вычислялась по методике [8], считающейся на настоящий момент стандартной. Для этого с каждой версией модели был проведен доиндустриальный численный эксперимент продолжительностью 150 лет, в котором все воздействия были заданы на доиндустриальном уровне, а также эксперимент, где концентрация CO_2 была в 4 раза выше, также продолжительностью 150 лет. Равновесная чувствительность составляет для версии 1 величину 3.6 К, для версии 2 – 7.6 К, для версии 3 – 7.0 К. Значения равновесной чувствительности из литературы, полученные для удвое-

ния концентрации CO_2 , в этой работе приводятся к учетверению CO_2 домножением на 2, подразумеваемая логарифмическую зависимость равновесного потепления от концентрации CO_2 .

Для диагностики естественных колебаний климата доиндустриальный эксперимент для каждой из трех версий модели был продлен до 500 лет, не считая времени выхода на квазиравновесный климат. Глобальными мерами величины естественных колебаний климата были выбраны: среднеквадратичное отклонение (СКО) глобально осредненной температуры воздуха у поверхности средней за 1 год, 5 и 10 лет. Кроме того, вычислялось СКО 10-летних линейных трендов осредненной за год глобальной температуры поверхности, аналогично тому, как это сделано в [3]. Весь 500-летний временной интервал разбивался на 10-летние подинтервалы. Для каждого подинтервала методом наименьших квадратов вычислялось значение линейного тренда среднегодовой и среднеглобальной температуры. Затем вычислялось СКО таких значений линейных трендов для всего 500-летнего эксперимента.

Кроме параметров, связанных с глобально осредненной температурой, вычислялось СКО среднемесячной температуры относительно среднеклиматического годового хода, в первую очередь, для диагностики изменчивости, связанной с Эль-Ниньо. Для диагностики изменчивости, связанной с Тихоокеанским декадным колебанием (ТДК), по 5-летним средним аномалиям температуры поверхности океана (ТПО) в Тихом океане в области 40° ю.ш.– 40° с.ш., 130° в.д.– 90° з.д. вычислялись эмпирические ортогональные функции (ЭОФы).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 представлены СКО глобально осредненной температуры на временном масштабе 1 год, 5 и 10 лет, а также СКО 10-летнего тренда. СКО средних за 1 год при переходе от версии 1 к версии 2 немного уменьшается, с 0.089 до 0.082 К, хотя равновесная чувствительность увеличивается более чем вдвое, с 3.6 до 7.6 град. Для осреднения за 5 и 10 лет СКО для версии 1 также превышает СКО для версии 2. СКО 10-летних трендов для версии 1 и версии 2 практически одинаковы. Следовательно, в данном случае увеличение равновесной чувствительности более чем в два раза не приводит к увеличению амплитуды естественной изменчивости глобально осредненной температуры ни по одному из рассмотренных показателей.

Переход от версии 2 к версии 3 увеличивает СКО среднегодовой температуры и СКО 10-летних трендов глобально осредненной температуры, несмотря на то, что величина равновесной чув-

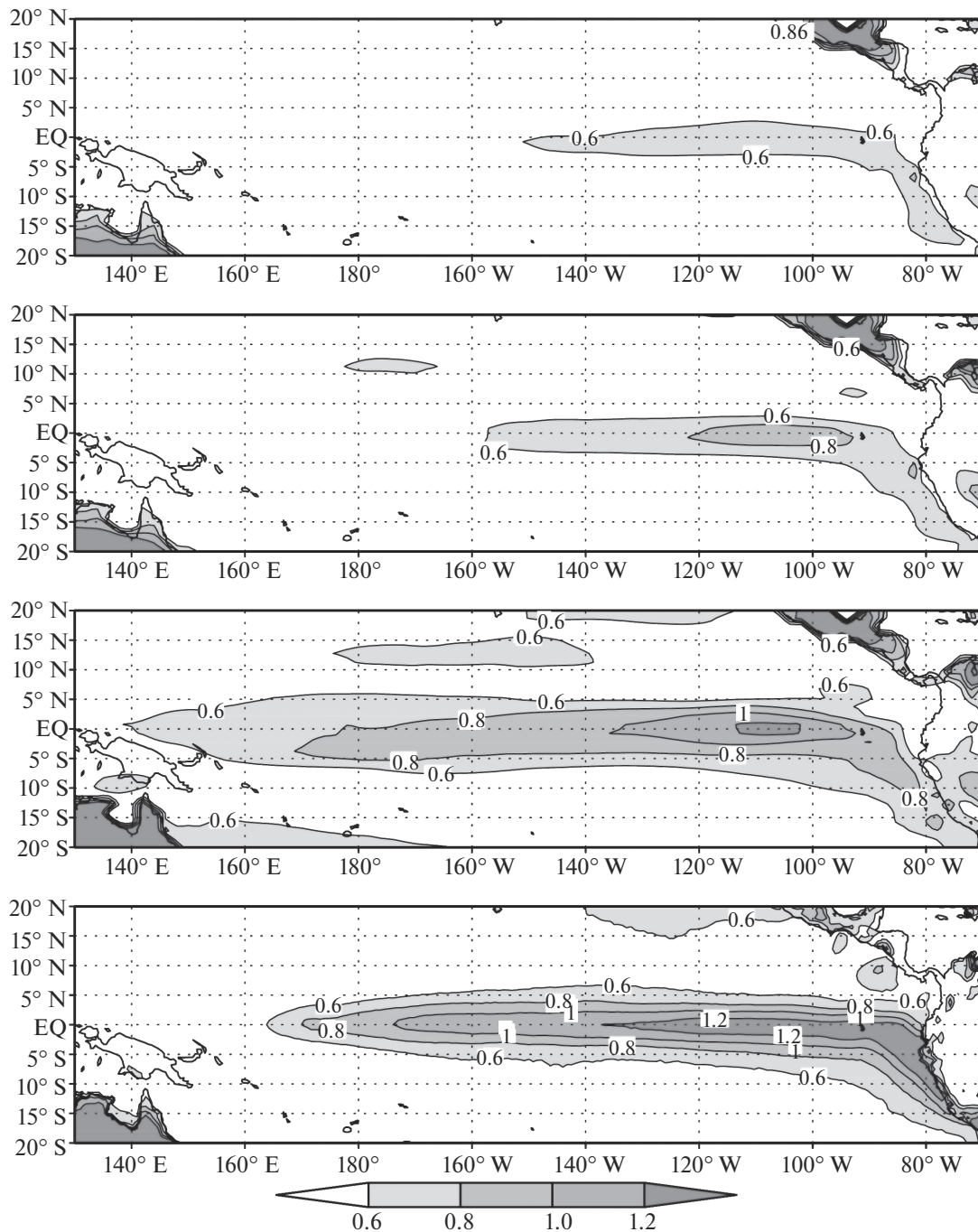


Рис. 1. Сверху вниз: среднеквадратичное отклонение среднемесячной температуры поверхности (К) от среднеклиматического годового хода в тропиках Тихого океана для модели 1, модели 2, модели 3 и реанализа ERA-Interim.

ствительности не увеличивается. В то же время, СКО 5-летней средней температуры в версии 2 и 3 практически совпадают, а СКО 10-летней средней температуры в версии 3 даже меньше, чем в версии 2. Это говорит о том, что в версии 3 рост СКО среднегодовой температуры произошел за счет роста изменчивости с характерным временем

несколько лет, а величина междекадной изменчивости не возросла.

Согласно линейной регрессии, полученной в [4] для моделей CMIP5 между СКО 10-летних трендов и равновесной чувствительностью (см. их рис. 2а), СКО 10-летних трендов, равное 0.106 К за 10 лет, соответствует равновесной чувствитель-

ности, равной 5.6 К, что далеко от равновесной чувствительности как версии 1, так и версии 2. Это означает, что данные версии 1 и версии 2 лежат далеко от регрессионной прямой, проведенной для моделей CMIP5. СКО 10-летних трендов, равное 0.139 К за 10 лет, соответствует согласно регрессионной прямой равновесной чувствительности 7.5 К, что не очень далеко от реальной равновесной чувствительности версии 3.

Сравнение СКО температуры поверхности в каждой точке показывает, что в среднем и СКО в каждой точке в версии 2 не возросла по сравнению с данными версии 1. Тем не менее, в некоторых районах рост СКО произошел, и один из этих районов – тропики Тихого океана (рис. 1). Еще больше СКО ТПО в районе Эль-Ниньо в версии 3, и в этой версии оно близко к СКО по данным ERA-Interim. Увеличение СКО в версии 2 по сравнению с версией 1 и в версии 3 по сравнению с версией 2 связано с изменением среднего состояния. Среднеклиматическая разность температур между востоком и западом тропического Тихого океана увеличивается от версии 1 к версии 2 и от версии 2 к версии 3, а большая средняя разность температур приводит и к большей интенсивности явления Эль-Ниньо, в кульминацию которого разность становится близкой к нулю.

Увеличение СКО в тропической части Тихого океана в версии 2 по сравнению с версией 1 и в версии 3 по сравнению с версией 2 происходит и на более долгих временных масштабах. Если рассматривать 5-летнюю среднюю температуру, то ее СКО, осредненное по тропической части Тихого океана (20° ю.ш.–20° с.ш., 140° в.д.–100° з.д.), составляет для версии 1 – 0.12 К, для версии 2 – 0.15 К, для версии 3 – 0.22 К. Возрастает и доля дисперсии, приходящаяся на первую ЭОФ, представляющую собой Тихоокеанское декадное колебание. По данным версии 1, на нее приходится 15% всей дисперсии, версии 2 – 24% дисперсии, версии 3 – 34% дисперсии. Причиной, по-видимому, также является рост разности ТПО между западом и востоком Тихого океана.

ВЫВОДЫ

Анализ данных проведенных экспериментов показывает, что для трех рассмотренных версий модели климата ИВМ нет зависимости между равновесной чувствительностью и амплитудой естественных колебаний климата, индикатором которых является глобально осредненная температура поверхности. Это не соответствует выводам [3], полученным для всего множества моделей CMIP5. С другой стороны, изменения, связанные с учетом облачности АПС, не сильно влияющие на равновесную чувствительность, заметно влияют на естественные колебания глобально осредненной температуры и в еще большей степени на межгодовую изменчи-

вость в тропиках Тихого океана, связанную с Эль-Ниньо и тихоокеанским декадным колебанием. Следовательно, вероятные причины связи амплитуды естественной изменчивости и равновесной чувствительности, показанные на простой модели в [4], не являются универсальными и нуждаются в дальнейшем исследовании.

Работа выполнена в ИВМ РАН при поддержке РНФ, грант 20-17-00190.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Flato G., Marotzke J., Abiodun B., Braconnot P., Chou S.C., Collins W., Cox P., Driouech F., Emori S., Eyring V., Forest C., Gleckler P., Guilyardi E., Jakob C., Kattsov V., Reason C., Rummukainen M. Evaluation of Climate Models // In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press.
2. Zelinka M.D., Myers T.A., McCoy D.T., Po-Chedley S., Caldwell P.M., Ceppi P., Klein S., Taylor K. Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. e2019GL085782. <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>
3. Nijse F., Cox P.M., Huntingfort C., Williamson M. Decadal global temperature variability increases strongly with climate sensitivity // Nat. Clim. Change 2019. V. 9. P. 598–601. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0527-4>
4. Cox P.M., Huntingfort C., Williamson M. Emergent constraint on equilibrium climate sensitivity from global temperature variability // Nature. 2018. V. 553. P. 319–322. <https://doi.org/10.1038/nature25450>
5. Володин Е.М. Равновесная чувствительность модели климата к увеличению концентрации CO₂ в атмосфере при различных методах учета облачности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 139–145.
6. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin V.Ya., Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G., Shestakova A.A., Emelina S.V. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model // Russian J. Num. Anal. Math. Modeling. 2018. V. 33. № 6. P. 367–374.
7. Tiedtke M. Representation of clouds in large-scale models // Mon. Weather Rev. 1993. V. 121. P. 3040–3061.
8. Gregory J.M., Ingram W.J., Palmer M.A., Jones G.S., Stott P.A., Thorpe R.B., Lowe J.A., Johns T.C., Williams K.D. A new method for diagnosing radiative forcing and climate sensitivity // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L03205. <https://doi.org/10.1029/2003GL018747>

Natural Climate Variability and Equilibrium Sensitivity to Increase of CO₂ in Climate Model of INM RAS

E. M. Volodin*

Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Gubkina str., 8, Moscow, 119333 Russia

**e-mail: volodinev@gmail.com*

The amplitude of natural climate variance is considered in several versions of INM RAS climate model with different equilibrium sensitivity. It was shown that root mean square deviation of global mean surface temperature for model version with equilibrium sensitivity equal 3.6 and 7.6 K are approximately the same. There is no increase in the amplitude of natural climate variability for model with high sensitivity for both global mean and regional values. But, some increase of the amplitude of natural variability in Pacific, including El-Nino and Pacific Decadal Oscillation, occurs after the change of treatment for atmospheric boundary layer cloudiness generation, while there are small changes in equilibrium climate sensitivity.

Keywords: model, climate, sensitivity, variability, amplitude