К.П. Беляев, Н.П. Тучкова,
Г.М. Михайлов, А.Н. Сальников

**Ансамблевые эксперименты с
совместной моделью MPI-ESM
«океан-земля-атмосфера» и
некоторые оценки ее устойчивости**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки

Беляев К.П., Тучкова Н.П., Михайлов Г.М., Сальников А.Н. Ансамблевые эксперименты с совместной моделью MPI-ESM «океан-земля-атмосфера» и некоторые оценки ее устойчивости // Научный сервис в сети Интернет: труды XXI Всероссийской научной конференции (23-28 сентября 2019 г., г. Новороссийск). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2019. — С. 141-152. — URL: <http://keldysh.ru/abrau/2019/theses/02.pdf> doi:[10.20948/abrau-2019-02](https://doi.org/10.20948/abrau-2019-02)

Размещена также [презентация к докладу](#)

Ансамблевые эксперименты с совместной моделью MPI-ESM «океан-земля-атмосфера» и некоторые оценки ее устойчивости

К.П. Беляев^{1,2}, Н.П. Тучкова¹, Г.М. Михайлов¹, А.Н. Сальников^{1,3}

¹*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН*

²*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН*

³*ФОУ ВПО "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова", факультет ВМК*

Аннотация. В работе проведены ансамблевые вычислительные эксперименты с моделью MPI-ESM института метеорологии им. М. Планка (Германия). Задавалась серия различных начальных значений полей характеристик и модель интегрировалась, начиная с каждого из этих полей на 10 лет. Изучались поведение среднего поля из этих расчетов, характеристики отклонений модельных расчетов от среднего поля, наиболее вероятные траектории ряда характеристик, поведение распределений некоторых параметров и ряд других задач. Делались также оценки устойчивости модельных расчетов к возмущению начальных полей. Численные расчеты выполнялись на суперкомпьютере Ломоносов-2 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Ключевые слова: нелинейные модели циркуляции, численные ансамблевые эксперименты, анализ устойчивости модельных траекторий.

Ensemble experiments with the nonlinear circulation ocean-earth-atmosphere MPIESM model and some assessments of its stability

K.P. Belyaev^{1,2}, N.P. Tuchkova¹, G.M. Mikhailov¹, A.N. Salnikov^{1,3}

¹*Dorodnicyn Computing Center FRC CSC of RAS, Vavilov str., 40, 11933, Moscow, Russia*

²*Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Nahimovskiy pr., 36, 117218 Moscow, Russia*

³*Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia*

Abstract. The results of the ensemble numerical experiments with the Earth System Model of the Max Planck Institute for Meteorology (MPIESM) from Hamburg, Germany are presented and discussed. Started from the set of different initial conditions the model is integrated sequentially for 10 years from each of those conditions. The average fields of different model characteristics and deviations from these average states were investigated. Also, the most probable trajectories using the statistical ensemble Monte-Carlo scheme are analyzed. The stability of the model trajectory as a solution of non-linear differential system to the perturbations of the initial conditions is also numerically evaluated. The comparisons with the natural tendencies are also performed. Numerical calculations were carried out on the Lomonosov-2 supercomputer of Lomonosov Moscow State University.

Keywords: Non-linear circulation models, Ensemble numerical experiments, analysis of stability of the model trajectories.

Введение

Ансамблевые эксперименты со сложными нелинейными моделями - один из самых распространенных и относительно легко реализуемый метод исследования модельных траекторий, их поведения во времени и пространстве, а также изучение условий их устойчивости при достаточно длительном промежутке интегрирования. С другой стороны, эти численные эксперименты требуют использования большого объема вычислительных мощностей, компьютерного времени и памяти, решения задач визуализации результатов и многих сопутствующих проблем. В последние годы, благодаря значительному прогрессу в области вычислительных мощностей и численного моделирования, систем накопления и обработки больших данных, ансамблевые эксперименты становятся доступными многим исследовательским группам и отдельным пользователям, принадлежащим определенному научному сообществу. Это, в свою очередь, способствует дальнейшему развитию численного моделирования, возможностям анализа модельных данных, полученных результатов с последующим сравнением.

Сегодня достаточно много исследовательских работ с современными моделями. Работы по численному моделированию климата ведутся различными международными группами, например, это модели GFDL [1], NEMO [2], MPI-ESM Макса Планка [3] и другие. Среди российских разработок наиболее известны в этой области модели ИВМ им. Г.И. Марчука РАН, например, [4-5]. Многие результаты, признанные научной общественностью, представлены в бюллетене МГЭИК [6], где дается анализ физических характеристик и анализ окружающей среды на основе модельных результатов.

Научный интерес к моделированию климата и численным моделям вызван не только их практической значимостью, но и потому, что эти модели значительно обогащают исследования в области нелинейных систем дифференциальных уравнений и способствуют пониманию природы моделируемых процессов.

В частности, проблема устойчивости и чувствительности модели к начальным возмущениям очень интересна и требует серьезного анализа от исследователей. Применительно к нашей задаче необходимо заметить, что система уравнений достаточно сложна, и аналитические методы не работают, за исключением нескольких простых случаев. Чтобы получить достаточно обоснованные результаты, необходимо обеспечить ряд вычислительных экспериментов и провести углубленный анализ полученных результатов. Некоторые работы в этом направлении представлены в [7]. Однако эта область исследований настолько обширна, что, хотя моделирование климата началось с середины XX в., когда появились первые возможности и ресурсы ЭВМ, нельзя утверждать, что к настоящему времени не осталось направлений для фундаментального анализа.

В данной работе мы изучаем поведение основных физических характеристик за определенный временной период интегрирования по модели MPI-ESM, упомянутой выше [3]. В экспериментах был выбран набор начальных данных, состоящий из 50 различных полей и наблюдались модельные характеристики в течение 10 и более лет интегрирования с этими данными. Известно, что модельные уравнения приводят к разбросу результатов вычисления из-за начального возмущения. Анализируя этот разброс, мы можем оценить стабильность модели, чтобы оценить ее статистические и аналитические свойства и сделать вывод о ее физических и математических особенностях. Некоторые результаты представлены ниже.

Модель и исходные данные

Итак, в работе использована модель MPI-ESM [3]. Основная ее конфигурация представлена в рис. 1, который был ранее приведен в [8].

Рис. 1. Общая схема модели MPIESM

Как это показано на рис. 1, модель включает различные блоки, а именно, океан (MPIOM), атмосфера (ECHAM6), углерод, (HAMOCC), земной цикл водообмена (JSBACH) и другие. Блок OASIS управляет самой моделью. В нашей работе изменялись начальные данные только для блока MPIOM, хотя модель интегрировалась полностью. Основные уравнения, определяющие этот блок, следующие

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + fv &= -\frac{\partial P}{g\rho_0 \partial x} + \kappa \Delta u \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} - fu &= -\frac{\partial P}{g\rho_0 \partial y} + \kappa \Delta v \\
 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\
 \frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \mu \Delta \theta \\
 \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} &= \mu \Delta S \\
 \rho &= \rho(\theta, S, P)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Система уравнений (1) определяет состояние океана в любой момент времени t в точке (x, y, z) пространства (сетки). Здесь используются стандартные обозначения, а именно: u, v, w - компоненты вектора скорости, соответственно в северном, восточном и вертикальном (вниз) направлении; θ, S, ρ - соответственно обозначают потенциальную температуру, соленость и плотность; P - обозначает давление, ρ_0 - соответствующее среднее значение плотности по выбранному уровню z ; g - ускорение силы тяжести; f - параметр Кориолиса, равный $2\Omega \sin \varphi$, где Ω - угловая скорость вращения Земли ($7,2921 \times 10^{-5} \text{с}^{-1}$) вокруг оси; φ - географическая широта места; μ, κ - коэффициенты вязкости для скорости и температуры (солёности) в уравнениях (1); Δ - стандартный 2D-оператор Лапласа. Эта система решается численно в 2D-сетке для выбранных уровней z . Граничные условия задаются параметрами атмосферы (поверхность моря) и берутся из модели атмосферы, которая моделирует силу ветра, тепловые потоки и осадки (потоки пресной воды). Детали здесь опущены. Полностью описание модели приведено в [3].

В модели 2D-сетка криволинейна и расстояния между точками различны от 40 км в восточном и северном направлении в Южном полушарии до 15 км в

Полярной и Арктической зоне. От поверхности моря до дна задаются 40 уровней, и первые 15 уровней обеспечивают дискретизацию верхних 500 м. Другие детали конфигурации модели могут быть найдены в [8].

Были проведены серии ансамблевых экспериментов с различными сценариями. В частности, расчеты были проведены следующим образом: стартуя с 50 различных начальных условий из базы данных МГЭИК [6] (Межправительственная группа экспертов по изменению климата, МГЭИК, англ. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), модель интегрировалась последовательно в течение 10 лет. После интегрирования 50 различных полученных модельных полей записывались и анализировались. Вычислялись средние значения до и после интегрирования и аномалии относительно этих средних. Ниже представлены результаты расчетов и их анализ.

Результаты экспериментов и анализ полученных характеристик

По результатам моделирования были получены поля характеристик модели, которые изучены и представлены с помощью специальных графических средств, предназначенных для обработки netCDF, HDF и GRIB форматов (PanoplyWin <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>, GrADS <http://cola.gmu.edu/grads/> и др.).

На рис. 2 приведена разность среднеширотной поверхностной температуры за 10 лет интегрирования. Поле поверхностной температуры воды (ТПО) усреднялось по долготе и представлено по широтной изменчивости от Южного (-90°) до Северного (90°) полюсов. Сама по себе изменчивость этих температур невелика, в максимуме составляет 0.2°C и в минимуме -1.6°C . Интересно заметить, что максимум изменчивости за 10 лет приходится на среднеширотные зоны, где температура заметно (более чем на 1.5°C) уменьшается. В высоких широтах, как в Южном, так и Северном полушариях она возрастает на 0.2 градуса.

Можно отметить, что в поведении уровня океана (рис.3) заметна тенденция на увеличение, то есть уровень возрастает, причем максимум приходится на северные широты, где изменчивость уровня составляет около 0.3 м. Это соответствует наблюдаемым характеристикам поля уровня. Рост модельного уровня обусловлен внешними силами, связанными с атмосферой, которая в свою очередь зависит от значения карбона и других газов.

Отдельный интерес представляет рис. 4, где показано поле отклонений минимальных значений уровня океана от их средних за 10 лет. Величина (то есть разброс) отклонений за 10 лет заметно вырос и составляет в максимуме более метра. Отдельно выделяются полярные зоны и среднеширотные области в Тихом океане, где эти величины весьма значимы.

Рис. 2. Разница максимальных отклонений температуры от среднего на поверхности

Рис. 3. Кривая разницы максимальных отклонений относительно среднего уровня океана до и после интегрирования

Рис. 4. Поле разницы минимальных отклонений относительно средних полей уровня океана до и после интегрирования

Рис. 5. Поле отклонений дисперсий уровня океана до и после интегрирования

На рис. 5 приведено поведение разности дисперсии полей до и после интегрирования, осредненное по широтным кругам (то есть по долготе). Видно, что за 10 лет интегрирования заметно возрастает хаотичность, то есть величина

отклонений от средних полей, которая в основном сосредоточена в северных широтах. Величины этой хаотичности небольшие, но не пренебрежимо малые, их учет для понимания глобальных процессов существенен. Связаны эти величины также с внешним воздействием, которое обуславливается целым рядом причин, прежде всего парниковыми газами и другими факторами, по-видимому, антропогенного воздействия. Прогностические расчеты по модели MPI-ESM до 2027 г. также показывают рост потенциальной температуры в зоне Арктики, рис. 6.

Рис. 6. Кривая разницы потенциальной температуры за период 2000-2027 гг. в зоне Арктики (модельный прогноз MPI-ESM)

Полученные результаты с точки зрения физического смысла можно трактовать следующим образом. Проведенные эксперименты подтверждают тенденции глобального увеличения температуры, что соответствует реальным наблюдениям и выводам МГЭИК. Этот процесс происходит неравномерно. В высоких широтах нагрев происходит заметно интенсивнее, чем в среднем по глобусу. Вследствие этого повышения температуры происходит таяние льдов и другие климатические процессы, которые активно обсуждаются как в научном сообществе, так и на страницах прессы. В наших исследованиях такие процессы показаны, например, на рис. 7 прогноз изменения ледяного объема в зоне Российской Арктики за период 2000-2027 гг..

Рис. 7. Разница фракции льда в воде за период 2000-2027 гг. в зоне Российской Арктики (модельный прогноз MPI-ESM)

Рис. 8. Модельный прогноз MPI-ESM изменения льда на морской поверхности Арктики (метры) за период 1990-2027 гг.

На рис. 8 показано изменение льда на морской поверхности Арктики в целом за период 1990-2027 гг. Видно, что максимальные и минимальные

значения колеблются от метра до двух метров. Аналогичные результаты известны из целого ряда источников и отчетов МГЭИК [9] и ВМО [10] (Всемирная метеорологическая организация, ВМО, англ. World meteorological organization, WMO), что позволяет сделать выводы о достоверности полученных модельных результатов.

Отметим также, что факт увеличения дисперсии характеризует увеличение хаотичности в поведении природных процессов. В частности, это видно на увеличении аномально холодной и аномально жаркой сезонной температуры в различных частях планеты. Увеличение количества осадков, появление аномально сильных ветров, песчаных бурь в нехарактерных районах и в нехарактерное время года.

Отражение перечисленных явлений, в результатах численного моделирования, является следствием нелинейности рассматриваемой нами совместной модели океан-земля-атмосфера. Из этой нелинейности, например, следует, что средние значения характеристик при ансамблевом моделировании не совпадают со средними значениями самой модели, что представляет собой особый объект исследований.

Исследования такого рода нелинейных моделей нужны не только с точки зрения изучения систем нелинейных уравнений, но и для понимания природных процессов.

Заключение

В работе проведены численные эксперименты с глобальной совместной моделью MPI-ESM, которые направлены на выяснения характеристик устойчивости этой модели к возмущению начальных полей и влиянию различных факторов на поведение траекторий модели при длительном (декадном) интегрировании. Показано, что модель MPI-ESM достаточно хорошо "чувствует" возмущение начальных условий, производит адекватные результаты при этих возмущениях, но при этом устойчива к малым поправкам. Полученные при декадном интегрировании модельные поля вполне реалистичны, соответствуют наблюдаемым тенденциям и могут быть проанализированы, что и показано в работе. По результатам исследований сделаны оценки по поведению сложных нелинейных моделей, чувствительности к начальным возмущениям и анализ поведения этих возмущений.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-29-10085мк и в рамках бюджетных тем Министерства науки и высшего образования РФ научных организаций авторов. Третий автор выполнял исследования также по теме Министерства науки и высшего образования РФ № 0128-2019-0011.

Литература

1. Bronselaer B., Winton M., Griffies S.M., Stouffer R.J., Hurlin W.J., Rodgers K., Russell J.L. Change in future climate due to Antarctic meltwater // *Nature* 2018 V. 564, Issue 7734, p. 53-58. DOI:10.1038/s41586-018-0712-z.
2. Holt J., Polton J., Huthnance J., Wakelin S., Enda O'Dea E., Harle J., Yool A., Artioli Y., Blackford Y., Siddorn J., Inall M. Climate-Driven Change in the North Atlantic and Arctic Oceans Can Greatly Reduce the Circulation of the North Sea // *Geophysical Research Letters*, 2018. DOI:10.1029/2018GL078878.
3. Jungclaus J.H., Fischer N., Haak H., Lohmann K., Marotzke J., Matei D., Mikolajewicz U., Notz D., Storch J.S. Characteristics of the ocean simulations in the Max Planck Institute Ocean Model (MPIOM) the ocean component of the MPI-Earth system model // *JAMES*. 2013, Issue 2. P. 422-446. <https://doi.org/10.1002/jame.20023>.
4. Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б. Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации. Л. Гидрометиздат. 1987. 296 с.
5. Наац В.И., Наац И.Э. Математические модели и численные методы в задачах экологического мониторинга атмосферы. М. ФИЗМАТЛИТ. 2010. 328 с.
6. The Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/> (доступно 01.07.2019).
7. Breckling S.M., Pahlevani N.F. A sensitivity study of the Navier--Stokes- α model // *Computers and Mathematics with Applications* 2018. V. 75 P. 666--689
8. Belyaev K.P., Kirchner I., Kuleshov A.A., Tuchkova N.P. Numerical Realization of Hybrid Data Assimilation Algorithm in Ensemble Experiments with the MPIESM Coupled Model. In: Velarde M., Tarakanov R., Marchenko A. (eds). *The Ocean in Motion*. Springer Oceanography. 2018. P. 447-459. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_27.
9. Global warming of 1.5 °C <https://www.ipcc.ch/sr15/> (доступно 01.07.2019).
10. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019 https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5789 (доступно 01.07.2019).

References

1. Bronselaer B., Winton M., Griffies S.M., Stouffer R.J., Hurlin W.J., Rodgers K., Russell J.L. Change in future climate due to Antarctic meltwater // *Nature* 2018 V. 564, Issue 7734, p. 53-58. DOI:10.1038/s41586-018-0712-z.
2. Holt J., Polton J., Huthnance J., Wakelin S., Enda O'Dea E., Harle J., Yool A., Artioli Y., Blackford Y., Siddorn J., Inall M. Climate-Driven Change in the North Atlantic and Arctic Oceans Can Greatly Reduce the Circulation of the North Sea // *Geophysical Research Letters*, 2018. DOI:10.1029/2018GL078878.
3. Jungclaus J.H., Fischer N., Haak H., Lohmann K., Marotzke J., Matei D., Mikolajewicz U., Notz D., Storch J.S. Characteristics of the ocean simulations in the Max Planck Institute Ocean Model (MPIOM) the ocean component of the

- MPI-Earth system model // JAMES. 2013, Issue 2. P. 422-446. <https://doi.org/10.1002/jame.20023>.
4. Marchuk G.I., Dymnikov V.P., Zalesnyj V.B. Matematicheskie modeli v geofizicheskoy gidrodinamike i chislennyye metody ih realizacii. L. Gidrometizdat. 1987. 296 s.
 5. Naac V.I., Naac I.E. Matematicheskie modeli i chislennyye metody v zadachah ekologicheskogo monitoringa atmosfery M. FIZMATLIT. 2010. 328 s.
 - 6 The Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/> (access 01.07.2019).
 7. Breckling S.M., Pahlevani N.F. A sensitivity study of the Navier-Stokes- α model // Computers and Mathematics with Applications 2018 V. 75 P. 666-689.
 8. Belyaev K.P., Kirchner I., Kuleshov A.A., Tuchkova N.P. Numerical Realization of Hybrid Data Assimilation Algorithm in Ensemble Experiments with the MPIESM Coupled Model. In: Velarde M., Tarakanov R., Marchenko A. (eds). The Ocean in Motion. Springer Oceanography. 2018. P. 447-459. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_27.
 9. Global warming of 1.5 °C <https://www.ipcc.ch/sr15/> (access 01.07.2019).
 10. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019 https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5789 (access 01.07.2019).