

УДК 519.6 + 519.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СОВМЕСТНОЙ МОДЕЛИ К ВОЗМУЩЕНИЮ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ

К. П. Беляев<sup>1</sup>, Г. М. Михайлов<sup>2</sup>, А. Н. Сальников<sup>3</sup>, Н. П. Тучкова<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Федерального  
исследовательского центра «Информатика и управление» Российской  
академии наук (РАН), г. Москва

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
факультет вычислительной математики и кибернетики, г. Москва

<sup>1</sup>kosbel55@gmail.com, <sup>2</sup>gmickail@ccas.ru, <sup>3</sup>salnikov@angel.cs.msu.ru,

<sup>4</sup>natalia\_tuchkova@mail.ru

### **Аннотация**

Задача устойчивости рассматривается в терминах классического определения Ляпунова. Для этого задается множество начальных условий, состоящих из данных предварительных расчетов, и анализируется разброс траекторий, полученных в результате численного моделирования. Эта процедура реализована как серия ансамблевых экспериментов с совместной моделью MPI-ESM института метеорологии М. Планка (Германия). Для численного моделирования задавалась серия различных начальных значений полей характеристик, и модель интегрировалась, начиная с каждого из этих полей, на различные временные периоды. Изучались экстремальные характеристики уровня океана за период 30 лет. Строилось их статистическое распределение, оценивались параметры этого распределения, изучался статистический прогноз на 5 лет вперед. Показано, что статистический прогноз уровня соответствует расчетному прогнозу, полученному по модели. Изучалась локализация экстремальных значений уровня и проводился анализ этих результатов. 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

## **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 изучения 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 имеется 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, [5, 6]. Многие результаты, признанные научной общественностью, представлены в бюллетене МГЭИК [7], где дан анализ физических характеристик и окружающей среды на основе модельных результатов.

Научный интерес к моделированию климата и численным моделям вызван не только их практической значимостью, но и тем, 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. 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 обес-

печить ряд вычислительных экспериментов и провести углубленный анализ полученных результатов. Некоторые работы в этом направлении представлены в [8]. 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.

## 1. МОДЕЛЬ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В работе использована Модель земной системы института Метеорологии М. Планка, MPI-ESM [3], которая была включена экспертами в проект по взаимному сопоставлению климатических моделей (CMIP5) [4]. Основная ее конфигурация многократно была представлена в публикациях и показана на рис. 1.

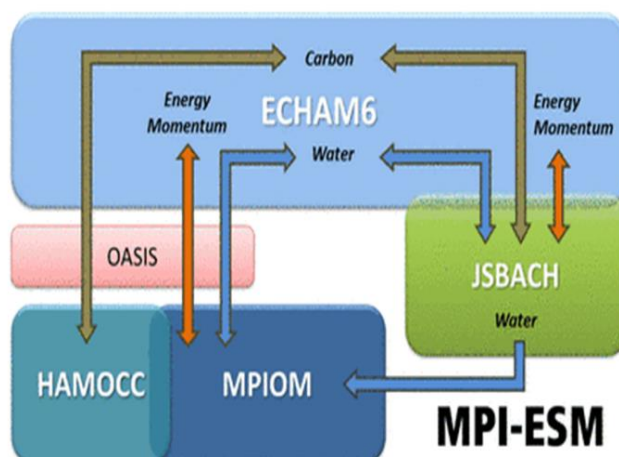


Рис. 1. Общая схема модели MPI-ESM

Модель включает различные блоки, а именно, океан (MPIOM), атмосферу (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:

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

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) направлениях;  $\theta, S, \rho$  – соответственно обозначают потенциальную температуру, соленость и плотность;  $P$  обозначает давление,  $\rho_0$  – соответствующее среднее значение плотности по выбранному уровню  $z$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $f$  – параметр Кориолиса, равный  $2\Omega \sin \varphi$ , где  $\Omega$  – угловая скорость вращения Земли ( $7,2921 \times 10^{-5} \text{c}^{-1}$ ) вокруг оси;  $\varphi$  – географическая широта места;  $\mu, \kappa$  – коэффициенты вязкости для скорости и температуры (солёности) в уравнениях (1);  $\Delta$  – 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 используется криволинейная 2D-сетка, и расстояния между точками различны от 40 км в восточном и северном направлении в Южном полушарии до 15 км в Полярной и Арктической зонах. 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 [9].

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 [7] (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.

## **2. 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. Подобное исследование выполнялось ранее в [10], наше несколько отличается по локализации представленных результатов. Поле поверхностной температуры воды (ТПО) усреднялось по долготе и представлено по широтной изменчивости от Южного ( $-90^\circ$ ) до Северного ( $90^\circ$ ) полюсов. Сама по себе изменчивость этих температур невелика, в максимуме составляет  $0.2^\circ\text{C}$  и в минимуме  $-1.6^\circ\text{C}$ . Интересно заметить, что максимум изменчивости за 10 лет приходится на среднеширотные зоны, где температура заметно (более чем на  $1.5^\circ\text{C}$ ) уменьшается. В высоких широтах, как в Южном, так и Северном полушариях, она возрастает на  $0.2$  градуса.

---

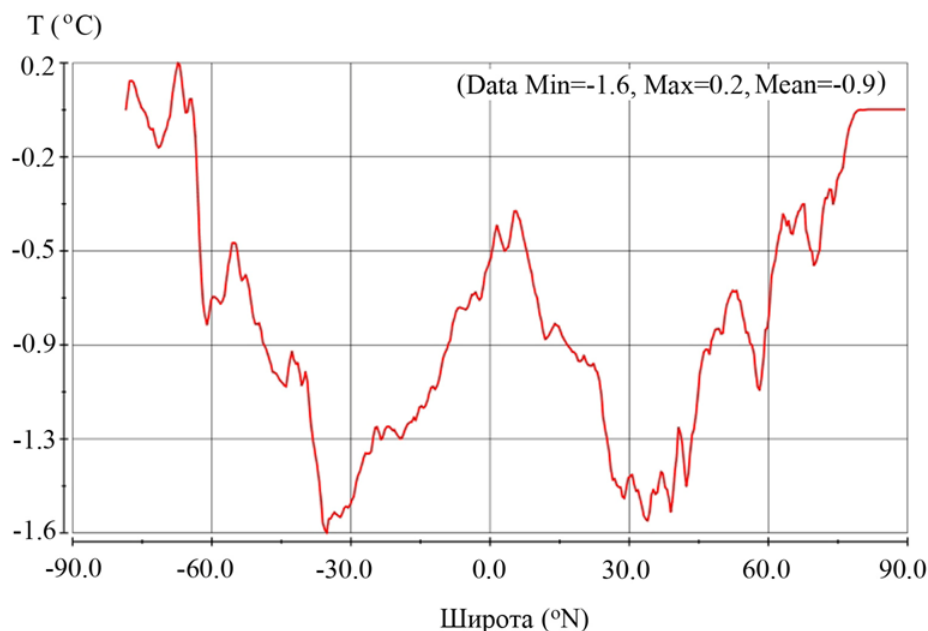


Рис. 2. Разница максимальных отклонений температуры от среднего на поверхности

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.

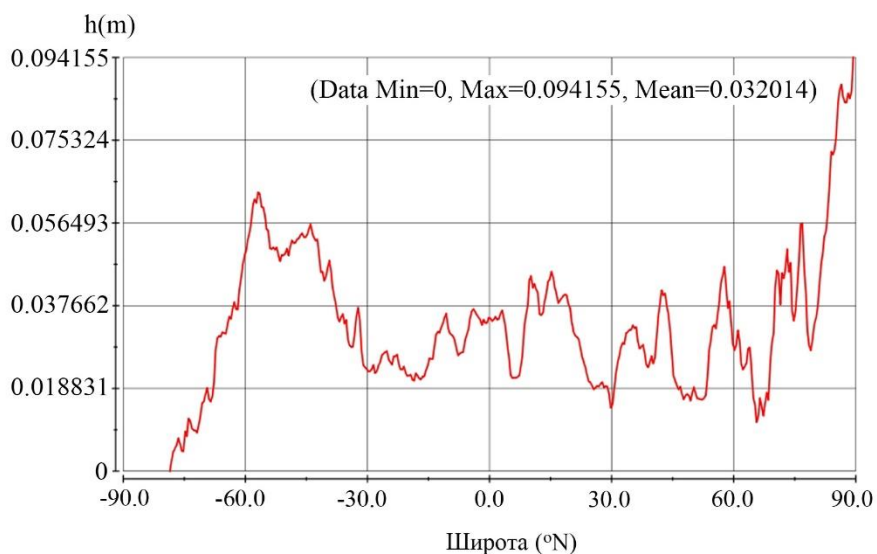


Рис. 3. Кривая разницы максимальных отклонений относительно среднего уровня океана до и после интегрирования

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 выросла и составляет в максимуме более метра. Отдельно выделяются полярные зоны и среднеширотные области в Тихом океане, где эти величины весьма значимы.

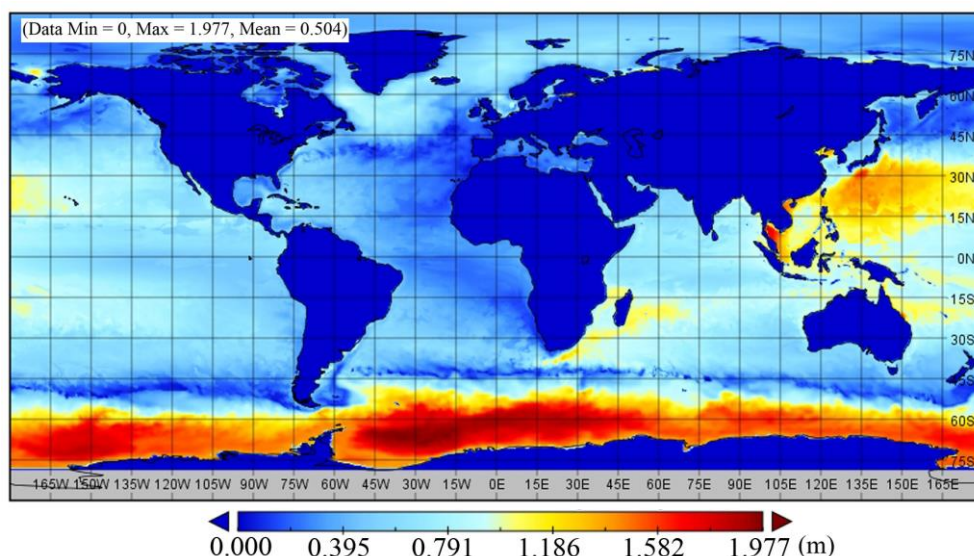


Рис. 4. Поле разницы минимальных отклонений относительно средних полей уровня океана до и после интегрирования

Рисунки 5 и 6 показывают характеристики прогностического уровня океана и его изменчивости на всем периоде интегрирования. На рис. 5 показан результат модельного расчета уровня океана на период 2000–2007 гг., а на рис. 6 – соответствующая разница значений уровня на этот же период для зоны Северного моря и Российской зоны Арктики. Интересно отметить, что по прогнозу в Российской Арктике уровень будет в основном возрастать, причем довольно значительно, до 7 см, к востоку от Новой Земли и в районе Тербенской губы. Это хорошо согласуется с прогнозом роста поверхностной температуры воды (ТПО) и таяния льдов (см. далее рис. 8–10). В Северном море, наоборот, видно некоторое понижение уровня, около 5–6 см. Общее изменение разнонаправленное, от  $-0.104$  м до  $0.076$  м.

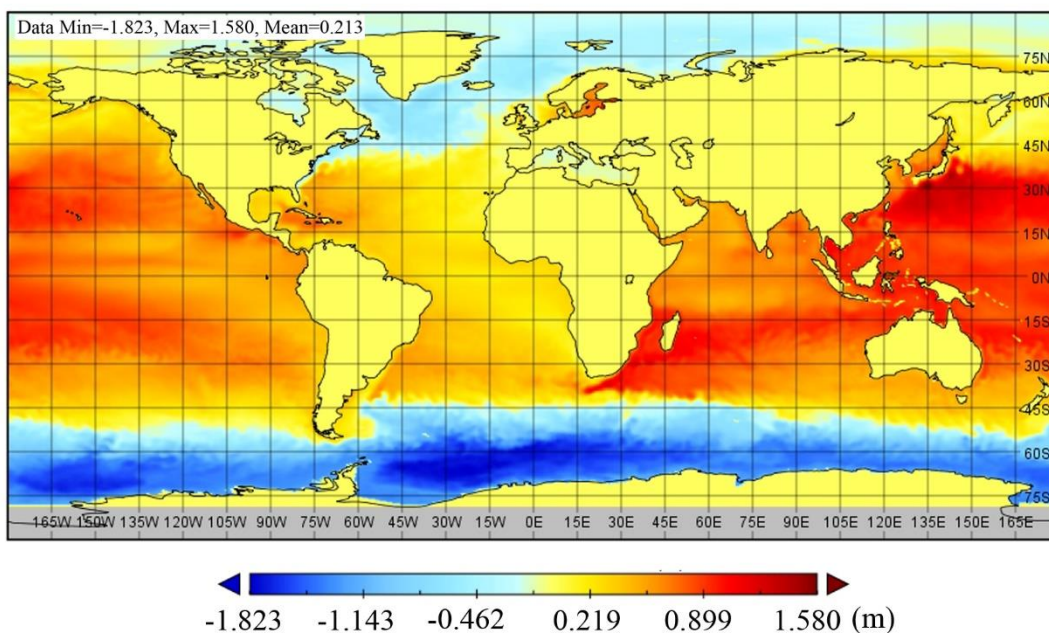


Рис. 5. Модельный прогноз уровня уровня океана (метры) 2000–2027 гг.

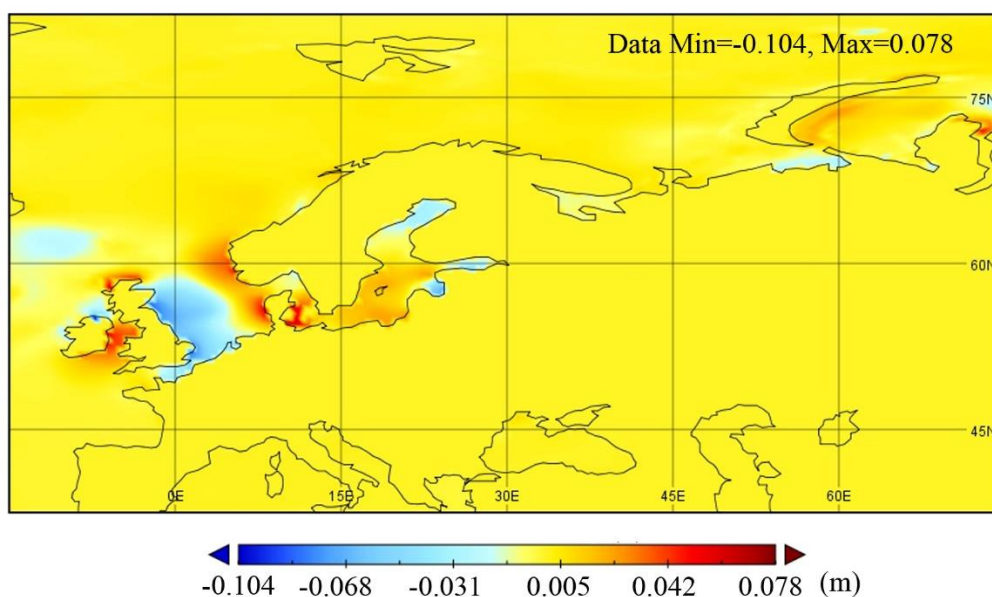


Рис. 6. Модельный прогноз изменения уровня уровня океана (метры) в зоне Российской Арктики 2000–2027 гг.

На рис. 7 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. Результаты прогнозирования изменения ТПО отражены на рис. 8–10.

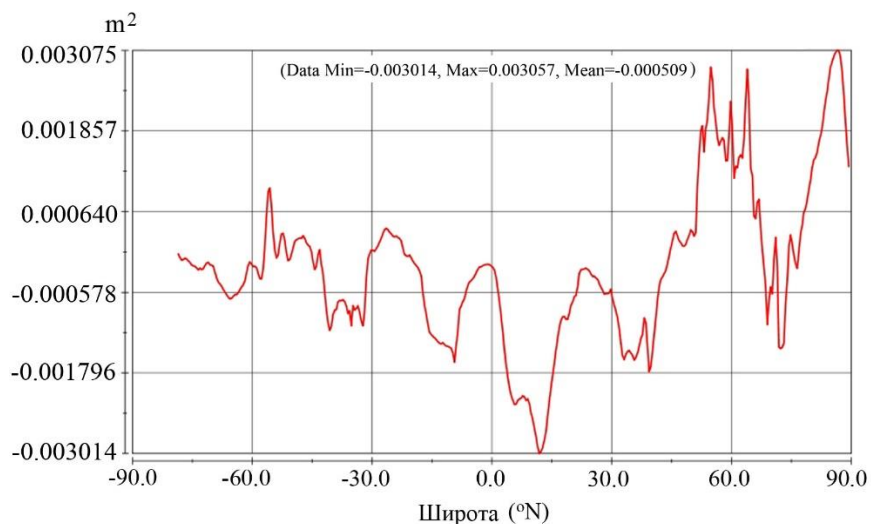


Рис. 7. Поле отклонений дисперсий уровня океана до и после интегрирования на период 10 лет

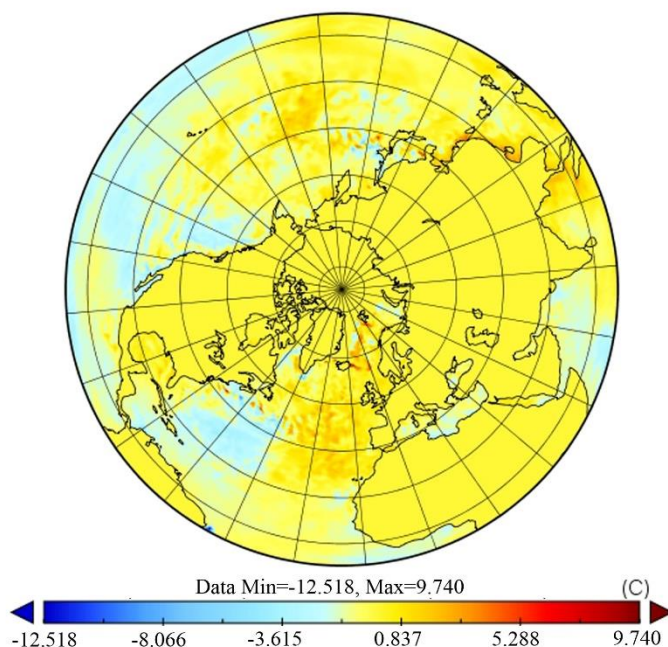


Рис. 8. Разница потенциальной поверхностной температуры в Арктике 2000–2027 (прогноз MPI-ESM)

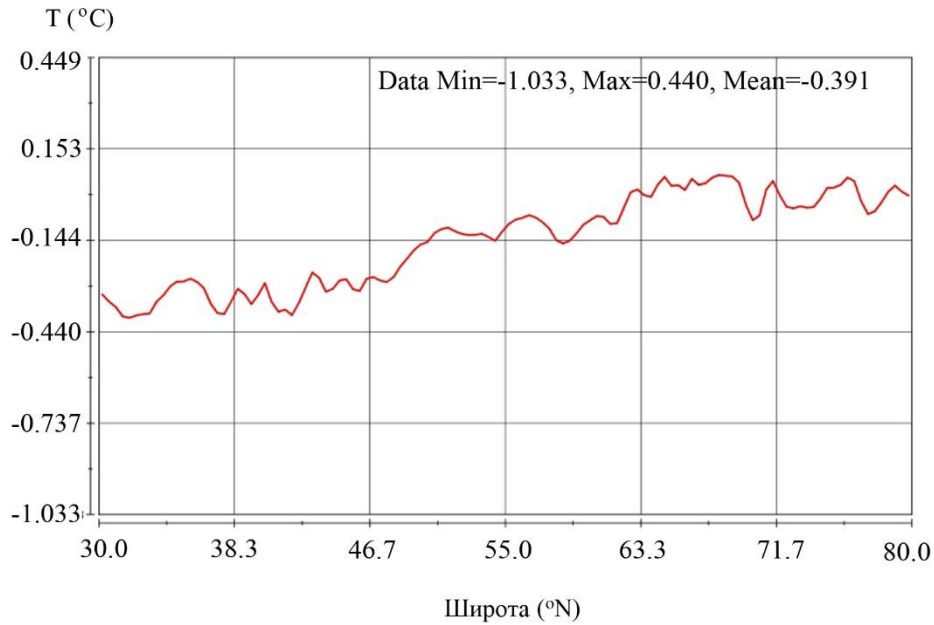


Рис. 9. Кривая роста потенциальной температуры в зоне Арктики 2000–2027 гг. (модельный прогноз MPI-ESM)

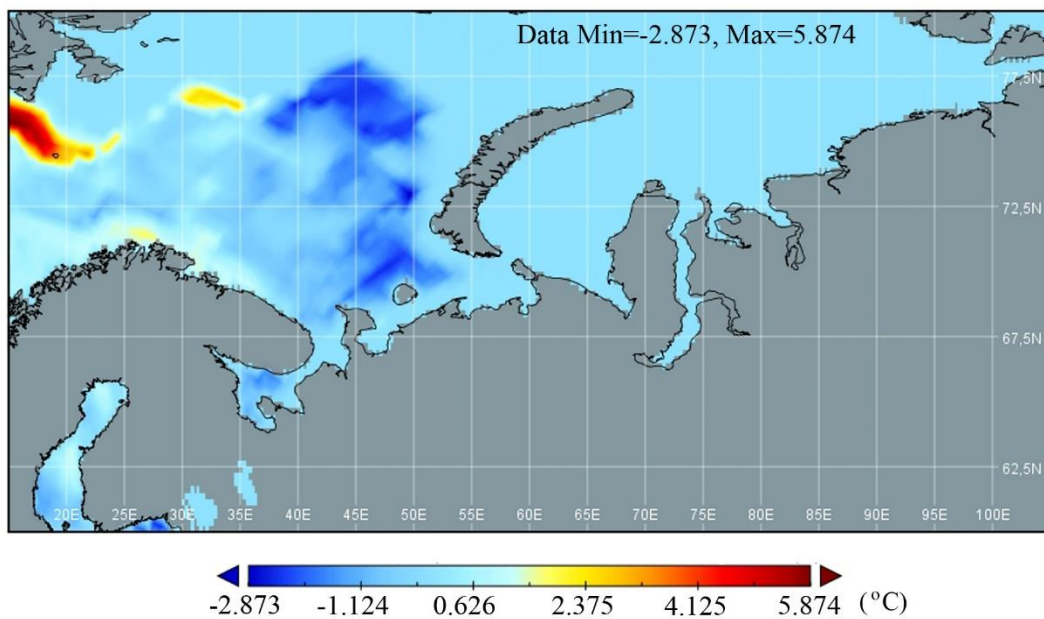


Рис. 10. Разница потенциальной поверхностной температуры в Российской зоне Арктики 2000–2027 гг (прогноз MPI-ESM)

На рис. 11, 12 показан модельный прогноз для изменения фракции льда в Арктике и Российской зоне Арктики, ранее показано в [11] по другой версии модели MPI ESM).

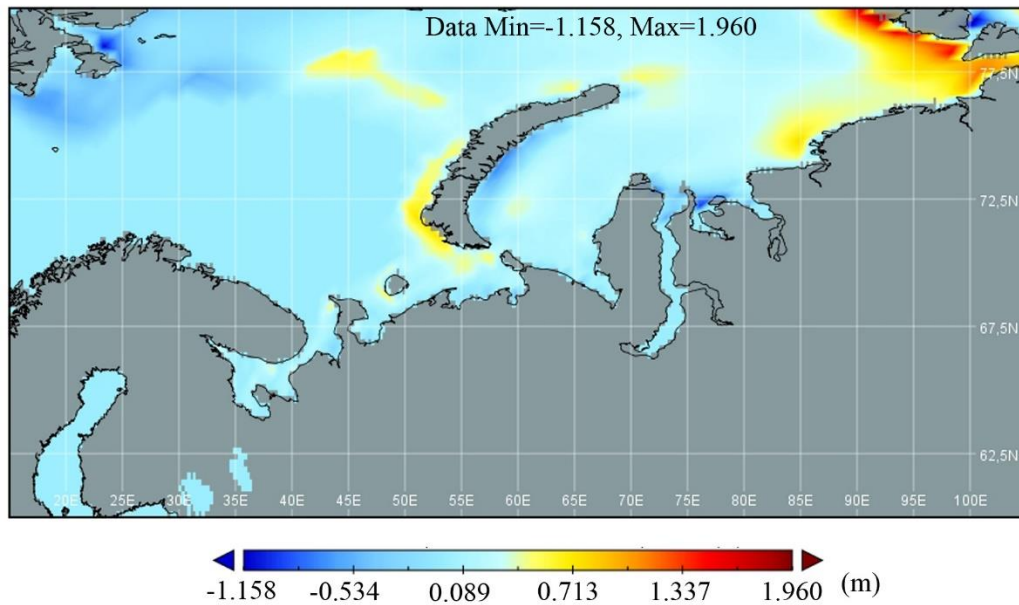


Рис. 11. Разница фракции льда в воде в Российской зоне Арктики 2000–2027 гг. (прогноз MPI-ESM)

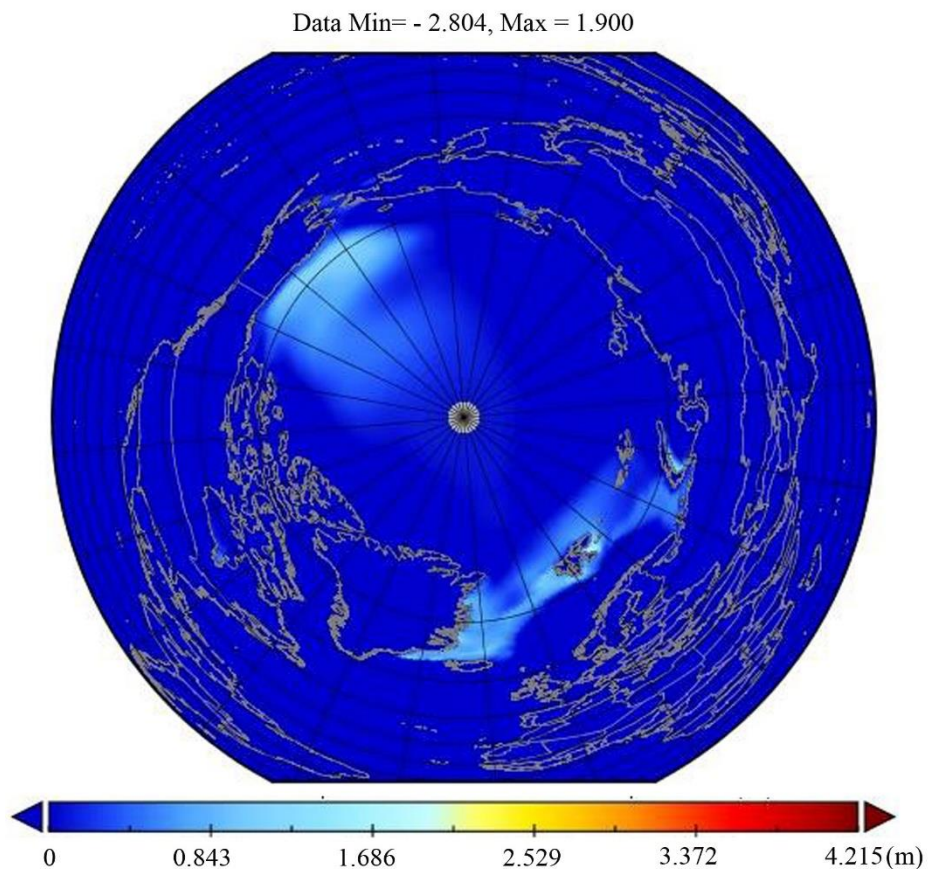


Рис. 12. Модельный прогноз (MPI-ESM) изменения льда на морской поверхности Арктики (метры) 1990–2027 гг.

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 не показаны, однако они известны из целого ряда источников и отчетов МГЭИК [12] и ВМО [13] (Всемирная метеорологическая организация, ВМО, англ. World meteorological organization, WMO) и других исследований, например, [14].

Отметим также, что факт увеличения дисперсии характеризует увеличение хаотичности в поведении природных процессов. В частности, это видно на увеличении аномально холодной и аномально жаркой сезонных температур в различных частях планеты. Наблюдаются 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) интегрирова-

нии. 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 анализу поведения этих возмущений.

### **БЛАГОДАРНОСТИ**

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 №0149-2019-0004.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0712-z> (доступно 07.11.2019)

2. Holt J., Polton J., Huthnance J., Wakelin S., Enda O'Dea E., Harle J., Yool A., Artoli 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. <https://doi.org/10.1029/2018GL078878> (доступно 07.11.2019)

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 // *J. of Advances in Modeling Earth Systems*. 2013. Issue 2. P. 422–446. <https://doi.org/10.1002/jame.20023> (доступно 07.11.2019)

4. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bulletin American Meteorological Society*. 2012. V. 93. No. 4. <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/BAMS-D-11-00094.1> (доступно 07.11.2019)

5. Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б. Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации. Л.: Гидрометиздат, 1987. 296 с.

6. Наац В.И., Наац И.Э. Математические модели и численные методы в задачах экологического мониторинга атмосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 328 с.

7. The Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/> (доступно 01.07.2019)

8. Breckling S.M., Pahlevani N.F. A sensitivity study of the Navier-Stokes- $\alpha$  model // *Computers and Mathematics with Applications*. 2018. V. 75. P. 666-689.

9. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_27)

10. *Baehr J., Fröhlich K., Botzet M. et al.* The prediction of surface temperature in the new seasonal prediction system based on the MPI-ESM coupled climate model // *Climate Dynamic*. 2015. V. 44. Issue 9-10. P. 2723–2735. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2399-7>

11. *Notz D., Haumann F.A., Haak H., Jungclaus J.H., Marotzke J.* Arctic sea-ice evolution as modeled by Max Planck Institute for meteorology's Earth system model // *J. of Advances in Modeling Earth Systems*. 2013. V. 5. P. 173–194. <https://doi.org/10.1002/jame.20016> (доступно 07.11.2019)

12. Global warming of 1.5 °C <https://www.ipcc.ch/sr15/> (access 01.07.2019)

13. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=5789](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5789) (доступно 07.11.2019)

14. *Koul V., Schrum C., Düsterhus A., Baehr J.* Atlantic Inflow to the North Sea Modulated by the Subpolar Gyre in a Historical Simulation with MPI-ESM // *J. of Geophysical Research: Oceans*, 2019. V. 124. Issue 3. P. 1807–1826. <https://doi.org/10.1029/2018JC014738> (доступно 07.11.2019)

---

## STABILITY STUDIES OF A COUPLED MODEL TO PERTURBATION OF INITIAL DATA

K. P. Belyaev<sup>1</sup>, G. M. Mikhaylov<sup>2</sup>, A. N. Salnikov<sup>3</sup>, N. P. Tuchkova<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Dorodnicyn Computing Center FRC CSC of RAS, Vavilov str., 40, 11933, Moscow

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Nahimovskiy pr., 36, 117218, Moscow

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, 11999, Moscow,

<sup>1</sup>kosbel55@gmail.com, <sup>2</sup>gmickail@ccas.ru, <sup>3</sup>salnikov@angel.cs.msu.ru,

<sup>4</sup>natalia\_tuchkova@mail.ru

### **Abstract**

The stability problem is considered in terms of the classical Lyapunov definition. For this, a set of initial conditions is set, consisting of their preliminary calculations, and the spread of the trajectories obtained as a result of numerical simulation is analyzed. This procedure is implemented as a series of ensemble experiments with a joint MPI-ESM model of the Institute of Meteorology M. Planck (Germany). For numerical modeling, a series of different initial values of the characteristic fields was specified and the model was integrated, starting from each of these fields for different time periods. Изучались экстремальные характеристики уровня океана за период 30 лет. The statistical distribution was built, the parameters of this distribution were estimated, and the statistical forecast for 5 years in advance was studied. It is shown that the statistical forecast of the level corresponds to the calculated forecast obtained by the model. The localization of extreme level values was studied and an analysis of these results was carried out. Numerical calculations were performed 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*

### **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. <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0712-z> (access 07.11.2019)



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. <https://doi.org/10.1029/2018GL078878> (access 07.11.2019)

3. Jungclaus J.H., Fischer N., Haak H., Lohmann K., Marotzke J., Matei D., Miko-lajewicz 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 // *J. of Advances in Modeling Earth Systems*. 2013. Issue 2. P. 422–446. <https://doi.org/10.1002/jame.20023> (access 07.11.2019)

4. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bulletin American Meteorological Society*. 2012. V. 93. No. 4. <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/BAMS-D-11-00094.1> (access 07.11.2019)

5. Marchuk G.I., Dymnikov V.P., Zalesnyj V.B. *Matematicheskie modeli v geofizicheskoj gidrodinamike i chislennye metody ih realizacii*. L.: Gidrometizdat, 1987. 296 s.

6. Naac V.I., Naac I.E. *Matematicheskie modeli i chislennye metody v zadachah ekologicheskogo monitoringa atmosfery*. M.: FIZMATLIT, 2010. 328 s.

7. The Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/> (access 07.11.2019).

8. Breckling S.M., Pahlevani N.F. A sensitivity study of the Navier-Stokes- $\alpha$  model // *Computers and Mathematics with Applications*. 2018. V. 75. P. 666–689.

9. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_27)

10. Baehr J., Fröhlich K., Botzet M. et al. The prediction of surface temperature in the new seasonal prediction system based on the MPI-ESM coupled climate model // *Climate Dynamic*. 2015. V. 44. Issue 9-10. P. 2723–2735. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2399-7>

11. Notz D., Haumann F.A., Haak H., Jungclaus J.H., Marotzke J. Arctic sea-ice evolution as modeled by Max Planck Institute for meteorology's Earth system model

// J. of Advances in Modeling Earth Systems. 2013.V. 5. P. 173–194, <https://doi.org/10.1002/jame.20016> (access 07.11.2019)

12. Global warming of 1.5 °C <https://www.ipcc.ch/sr15/> (access 01.07.2019)

13. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019 [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=5789](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5789) (access 07.11.2019)

14. Koul V., Schrum C., Düsterhus A., Baehr J. Atlantic Inflow to the North Sea Modulated by the Subpolar Gyre in a Historical Simulation With MPI-ESM // J. of Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. Issue 3. P. 1807–1826. <https://doi.org/10.1029/2018JC014738> (access 07.11.2019)

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**БЕЛЯЕВ Константин Павлович** – ведущий научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, доктор физ.-матем. наук, профессор кафедры теории вероятностей и статистики МГУ им. Ломоносова. Сфера научных интересов - математическое моделирование и усвоение данных наблюдений, статистический анализ натуральных данных.

**Konstantin Pavlovich BELYAEV** – leading scientist of Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science. Doctor of science, professor of Dept of Applied Math and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University. Research interests – math modelling and data assimilation, statistical analysis of natural data.

email: kosbel55@gmail.com



**МИХАЙЛОВ Гурій Михайлович** – ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, кандидат физ.-мат. наук. Сфера научных интересов – архитектура вычислительных систем и сетей, вычислительные и информационные технологии.

**Gury Mikhaylovich MIKHAYLOV** – leading scientist of Dorodnicyn computing center FRC SCS RAS, PhD in physics with a math degree. Research interests include architecture of computing systems and networks, computing and information technology.

email: gmickail@ccas.ru



**САЛЬНИКОВ Алексей Николаевич** – ведущий научный сотрудник кафедры математической физики факультета ВМиК МГУ М.В. им. Ломоносова, кандидат физ.-матем. наук. Сфера научных интересов – параллельное программирование, биоинформатика, суперкомпьютеры.

**Alexey Nikolaevich SALNIKOV** – leading researcher Dept of Applied Math and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University, PhD in physics with a math degree. Research interests include bioinformatics, parallel and supercomputing programming

email: salnikov@angel.cs.msu.ru



**ТУЧКОВА Наталья Павловна** – старший научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, кандидат физ.-мат. наук, окончила ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова. Специалист в области алгоритмических языков и информационных технологий.

**Natalia Pavlovna TUCHKOVA** – senior researcher of Dorodnicyn computing center FRC SCS RAS, PhD in physics with a math degree, graduated from CS Faculty of Lomonosov MSU. The expert in the field of algorithmic languages and information technologies.

email: natalia\_tuchkova@mail.ru

*Материал поступил в редакцию 15 ноября 2019 года*