

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.25>**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ, СВЯЗАННЫХ С ФОРМИРОВАНИЕМ СУПЕРКОНТИНЕНТА ПАНГЕЯ УЛЬТИМА**

Научная статья

**Пархоменко В.П.<sup>1,\*</sup>**<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-9963-0496;<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии Наук, Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (vparhom[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Результаты моделирования эволюции континентальных плит определяют, что через 250 миллионов лет сформируется единый континент в экваториальной зоне, называемый Пангея Ульtima. Трехмерная система уравнений океана, как часть модели климата, рассматривается в геострофическом приближении с добавлением фрикционного члена в горизонтальные уравнения импульса. Моделирование климата при условии формирования этого континента в сочетании с будущим увеличением солнечной постоянной и концентрации CO<sub>2</sub> показывает, что в крупных регионах суперконтинента будут превышать критические пороговые значения комплексного индекса температуры и влажности в летние сезоны на периоды более 30 дней. При концентрации CO<sub>2</sub> 800 ppm большая часть тропиков становится непригодной для жизни млекопитающих, а при 1200 ppm эта область распространяется на средние и высокие широты.

**Ключевые слова:** моделирование климата, глобальная климатическая модель, численные эксперименты, климат суперконтинента, прогноз.

**MODELLING OF EXTREME CLIMATIC CONDITIONS ASSOCIATED WITH THE FORMATION OF THE SUPERCONTINENT PANGAEA ULTIMA**

Research article

**Parkhomenko V.P.<sup>1,\*</sup>**<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-9963-0496;<sup>1</sup>Federal Research Center "Informatics and Management" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (vparhom[at]yandex.ru)

**Abstract**

The results of modelling the evolution of continental plates determine that in 250 million years a single continent in the equatorial zone, called Pangaea Ultima, will form. The three-dimensional ocean equation system, as part of the climate model, is viewed in the geostrophic approximation with the addition of a frictional term to the horizontal momentum equations. Climate modelling under the assumption of this continent formation coupled with future increases in solar constant and CO<sub>2</sub> concentration shows that large regions of the supercontinent will exceed critical thresholds of the complex temperature and humidity index during summer seasons for periods longer than 30 days. At a CO<sub>2</sub> concentration of 800 ppm, much of the tropics becomes uninhabitable for mammalian life, and at 1200 ppm this extends to mid and high latitudes.

**Keywords:** climate modelling, global climate model, numerical experiments, supercontinent climate, prediction.

**Введение**

Моделирование климата прошлого и будущего помогает понять долгосрочные изменения климата, их причины и последствия для биосферы. Результаты моделирования эволюции континентальных плит определяют [1], что через 250 миллионов лет сформируется единый континент в экваториальной зоне, называемый Пангея Ульtima. Моделирование климата при условии формирования единого суперконтинента в сочетании с будущим увеличением солнечной постоянной и концентрации CO<sub>2</sub> показывает, что в крупных регионах суперконтинента будут превышать критические пороговые значения комплексного индекса температуры и влажности в летние сезоны на периоды более 30 дней.

**Методы и принципы исследования**

При анализе долгосрочных изменений климата требуется рассматривать всю атмосферу, океан (с морским льдом) и деятельный слой суши (почва и растительность) как взаимодействующие части климатической системы [2].

В данной модели [3], [5] трехмерная система уравнений океана рассматривается в геострофическом приближении с добавлением фрикционного члена в горизонтальные уравнения импульса. Температура и соленость описываются адвекционно-диффузионными уравнениями, что позволяет учитывать термохалинную циркуляцию океана. Также включается процедура конвективного приспособления, необходимая для корректного моделирования вертикального перемешивания. На всех границах океана предполагается отсутствие нормального потока, что применимо как на границах материков, так и на поверхности и дне океана. На границах материков нормальные составляющие потоков тепла и солей принимаются равными нулю. На поверхности океана учитывается воздействие напряжения трения ветра. Потоки тепла и солености у дна океана полагаются равными нулю, а на поверхности океана определяются

взаимодействием с атмосферой. На каждом временном шаге поле скоростей определяется диагностически из поля плотностей. Это позволяет учесть изменения плотности воды и скорректировать соответствующим образом поле скоростей океанических течений. Вертикальная структура модели представлена уровнями, равномерно распределенными в логарифмических координатах. Такой подход позволяет сделать верхние слои модели более тонкими по сравнению с нижними, что важно для детального учета процессов, происходящих на поверхности океана. Горизонтальная сетка равномерная в координатах долготы и синуса широты, что задает ячейки одинаковой площади в пространстве [3].

Для описания процессов, происходящих в атмосфере, применяется однослойная энерго- и влаго-балансовая модель. Прогностическими переменными в этой модели являются температура воздуха и удельная влажность вблизи подстилающей поверхности. Дифференциальные уравнения, используемые для моделирования динамики морского льда, решаются для определения значений сплоченности и средней толщины льда. Все блоки модели связаны между собой обменом импульсом, теплом и водой. Потоки тепла между «смежными» блоками могут быть модифицированы фазовыми переходами на границах (испарением, таянием и т.д.). Материковые стоки воды добавляются в океанические ячейки на каждом шаге по времени. Полный обмен потоками тепла и воды над океаном зависит от сплоченности морского льда. Для расчета одного шага по времени для океана, морского льда и поверхностных потоков требуется несколько шагов по времени для атмосферы. Для атмосферы шаг обычно равен одним суткам, а для океана – несколько суток.

Моделирование тектонических движений континентов [1] определяет, что приблизительно через 250 миллионов лет все континенты сольются и сформируют суперконтинент Земли – Пангея Ультима (голубая и зеленая область на рис. 1). Естественным следствием образования Пангеи Ультима станут экстремальные значения  $\text{CO}_2$  из-за изменений в вулканическом рифтогенезе и газовыделении.

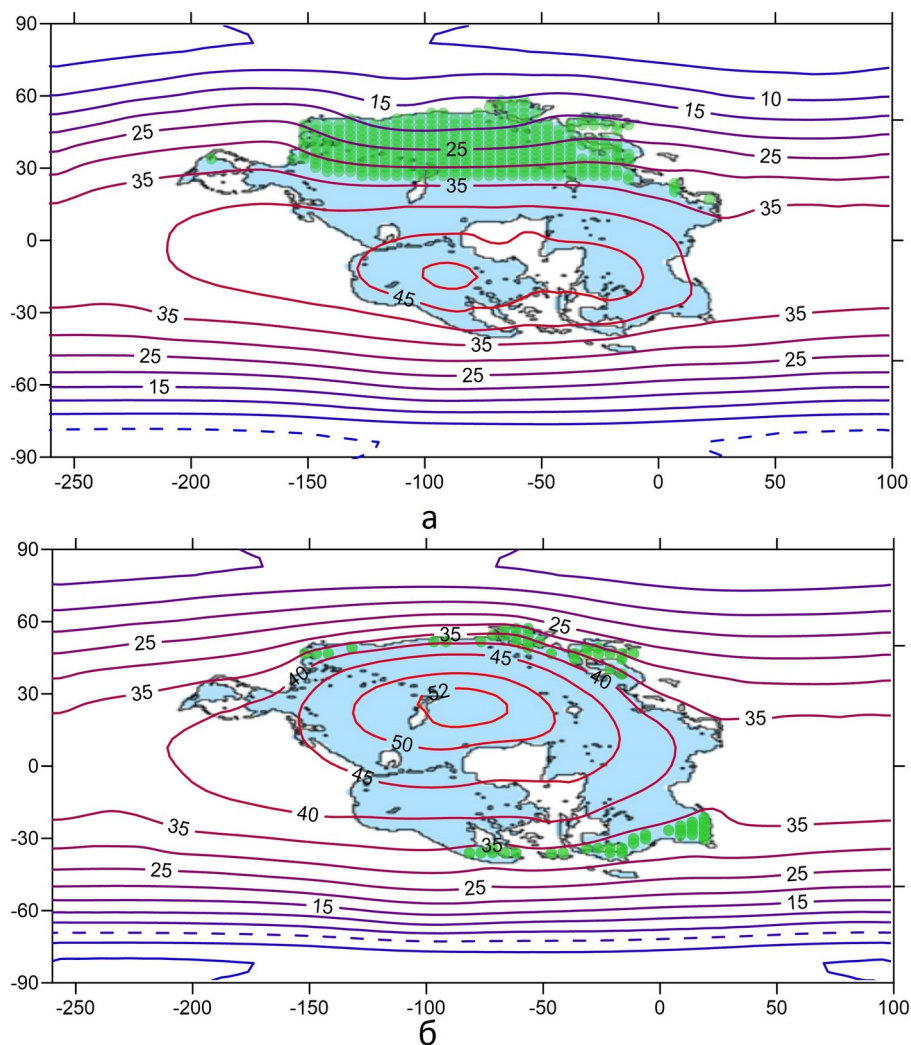


Рисунок 1 - Континент Пангея Ультима (голубая и зеленая области) на карте мира, изолинии температуры воздуха в  $^{\circ}\text{C}$  у подстилающей поверхности и области, пригодные для жизни млекопитающих (выделены зеленым цветом) для января (а) и июля (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.25.1>

Примечание: результаты для концентрации  $\text{CO}_2$  1200 ppm

Предполагается, что через 250 млн лет Солнце будет излучать на 2,5% больше энергии по сравнению с сегодняшним днем [6], [7], [8], [9]. В сочетании с тектоно-географическими изменениями содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере и усилением эффекта континентальности суперконтинентов, Земля может достичь переломного момента, делающего ее непригодной для жизни млекопитающих. Постоянная температура, большая 40 °C в сухих условиях может привести к летальному исходу. Гипертермия также возникает, когда температура окружающей среды превышает приблизительно 35 °C при относительной влажности, большей 50%, поскольку передача метаболического тепла за счет потока недостаточна. Воздействие выше этого порога в течение более 6 часов приводит к смертельному исходу [7], но этот порог редко достигается в современных условиях. В данной работе проводится исследование, как концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере, солнечная энергия и сплоченность континентов приводят к усиливающемуся потеплению.

### Основные результаты

На первом этапе исследования было учтено увеличение солнечной постоянной на 2.5% при современной концентрации CO<sub>2</sub>. При этом максимальная температура в июле достигала 42.6°C. В последующих расчетах были заданы три варианта концентрации CO<sub>2</sub> [6], [7], [8], [9]: 400 ppm (современный уровень), 800 ppm, 1200 ppm, так как точный прогноз концентрации не известен. Солнечная постоянная была зафиксирована на уровне 1402 Вт/м<sup>2</sup>. В модели используется равномерная по долготе и синусу широты конечно-разностная сетка 72×72 ячейки. Разрешение модели по долготе составляет 5°, а по широте оно изменяется от приблизительно 1.5° у экватора до приблизительно 10° у полюсов. Глубина океана представляется в виде восьмиуровневой логарифмической шкалы до 5000 м.

Из расчетов следует, что только при концентрации CO<sub>2</sub> 400 ppm морской лед сохраняется в долгосрочной перспективе, хотя его площадь значительно уменьшается (примерно в 6 раз). В сценариях с более высокими концентрациями углекислого газа (800 ppm, 1200 ppm) морской лед полностью исчезает.

При концентрации CO<sub>2</sub> равной 1200 ppm температурный режим показывает предельно экстремальные значения (рис. 1). Области с температурами выше 35°C покрывают практически все широты от 50° северной широты до 30° южной широты. Температура воздуха местами достигает 45°C-50°C. Это указывает на критическое повышение температур, что может существенно повлиять на экосистемы и климатические условия на планете. В соответствии с рекомендациями метеорологических служб по применению комплексного индекса температуры и влажности [7], [10], рассчитанного по результатам модельных расчётов, пригодными для жизни млекопитающих, с увеличением концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере до 1200 ppm, остаются только узкие полосы суши на севере и юге суперконтинента (зеленые области на рис.1).

### Заключение

При изменении расположения континентов в сочетании с будущим увеличением солнечной постоянной в крупных регионах суперконтинента будут превышать критические пороговые значения температуры на периоды более 30 дней. При концентрации CO<sub>2</sub> 400 ppm большая часть тропиков становится непригодной для жизни, а при 1200 ppm эта область распространяется на средние и высокие широты. Хотя высокие широты (более 50°) при 1200 ppm CO<sub>2</sub> могут спасти от слишком высоких температур, показатели зимнего климата еще больше снижают зону обитаемости. Вторичным воздействием низкой влагообеспеченности может быть снижение продуктивности и доступности пищи для млекопитающих на покрытых растительностью землях.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Scotese C.R. PALEOMAP Paleodigital Elevation MOdels (PaleoDEMS) for the Phanerozoic, PALEOMAP Project / C.R. Scotese, N. Wright // EarthByte. — 2018.
2. Монин А.С. Введение в теорию климата / А.С. Монин — Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. — 110 с.
3. Пархоменко В.П. Организация численных экспериментов на совместной глобальной модели атмосферы и океана / В.П. Пархоменко // Математическое моделирование и численные методы. — 2022. — № 4 (36). — С. 31–47. — DOI: 10.18698/2309-3684-2022-4-3147 .
4. Пархоменко В.П. Проблемы изменения и прогнозирования климата / В.П. Пархоменко // Энергетическая политика. — 2020. — № 10 (152). — С. 40–51. — DOI: 10.46920/2409-5516\_2020\_10152\_40.
5. Marsh R. Development of a fast climate model (C-GOLDSTEIN) for Earth System Science / R. Marsh, N.R. Edwards, J.G. Shepherd // SOC. — 2002. — № 83. — P. 1–54.
6. Wolf E.T. Delayed onset of runaway and moist greenhouse climates for Earth / E.T. Wolf, O.B. Toon // Geophys. Res. Lett. — 2014. — № 41. — P. 167–172 .
7. Masterson J. Humidex, A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity / J. Masterson, F.A. Richardson. — Downsview: Environment Canada, 1979. — 45 p.
8. Foster G.L. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years / G.L. Foster, D.L. Royer, D.J. Lunt // Nat. Commun. — 2017. — № 8. — P. 14845.

9. Anagnostou E. Changing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration was the primary driver of early Cenozoic climate / E. Anagnostou // *Nature*. — 2016. — № 533. — P. 380–384.

10. Farnsworth A. Climate extremes likely to drive land mammal extinction during next supercontinent assembly / A. Farnsworth, Y.T. Eunice Lo, P.J. Valdes // *Nature Geoscience*. — 2023. — № 16. — P. 901–908.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Scotese C.R. PALEOMAP Paleodigital Elevation MODels (PaleoDEMS) for the Phanerozoic, PALEOMAP Project / C.R. Scotese, N. Wright // *EarthByte*. — 2018.

2. Monin A.S. Vvedenie v teoriyu klimata [Climate theory introduction] / A.S. Monin — Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. — 110 p. [in Russian]

3. Parhomenko V.P. Organizatsiya chislennykh eksperimentov na sovmestnoj global'noj modeli atmosfery i okeana [Organization of numerical experiments based on a joint global model of the atmosphere and ocean] / V.P. Parhomenko // *Mathematical Modeling and Numerical Methods*. — 2022. — № 4 (36). — P. 31–47. — DOI: 10.18698/2309-3684-2022-4-3147. [in Russian]

4. Parhomenko V.P. Problemy izmeneniya i prognozirovaniya klimata [Problems of climate change and forecasting] / V.P. Parhomenko // *Energy Policy*. — 2020. — № 10 (152). — P. 40–51. — DOI: 10.46920/2409-5516\_2020\_10152\_40. [in Russian]

5. Marsh R. Development of a fast climate model (C-GOLDSTEIN) for Earth System Science / R. Marsh, N.R. Edwards, J.G. Shepherd // *SOC*. — 2002. — № 83. — P. 1–54.

6. Wolf E.T. Delayed onset of runaway and moist greenhouse climates for Earth / E.T. Wolf, O.B. Toon // *Geophys. Res. Lett.* — 2014. — № 41. — P. 167–172.

7. Masterson J. Humidex, A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity / J. Masterson, F.A. Richardson. — Downsview: Environment Canada, 1979. — 45 p.

8. Foster G.L. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years / G.L. Foster, D.L. Royer, D.J. Lunt // *Nat. Commun.* — 2017. — № 8. — P. 14845.

9. Anagnostou E. Changing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration was the primary driver of early Cenozoic climate / E. Anagnostou // *Nature*. — 2016. — № 533. — P. 380–384.

10. Farnsworth A. Climate extremes likely to drive land mammal extinction during next supercontinent assembly / A. Farnsworth, Y.T. Eunice Lo, P.J. Valdes // *Nature Geoscience*. — 2023. — № 16. — P. 901–908.