

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА НА ИНТЕРВАЛЕ ПОСЛЕДНИХ 540 МИЛЛИОНОВ ЛЕТ И ПРОГНОЗЫ БУДУЩЕГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Дергачев В.А.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

CLIMATE CHANGE OVER THE LAST 540 MILLION YEARS AND PROJECTIONS OF FUTURE CLIMATE CHANGE

Dergachev V.A.

Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg, Russia

According to the results of paleoclimatic studies, the modern stage of the Earth's climate history covers the shortest Quaternary geological period, about 3 million years. The question arises about future climate change after the currently observed warming. There is still no consensus among scientists explaining the processes that are currently occurring with the climate on Earth. The article analyzes climate change since the spread of complex life forms on our planet, i.e. the presence of developed plant and animal life on Earth, which began about 542 million years ago (Phanerozoic eon). Reconstructions of Phanerozoic temperature based on geological and isotopic data of sedimentology and paleoecology are considered. A comprehensive and quantitative assessment of how global temperatures have changed over the past 540 million years is given. To understand the trend of climate change after the end of the modern interglacial, long-term trends in changes in climatic characteristics at intervals of hundreds and tens of millions of years are considered. An overview of some of the different possible approaches taken to climate change is presented to demonstrate the need to build an interdisciplinary perspective on the problem.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-97-102>

Введение

В современном мире проблема изменения климата Земли на длительной временной шкале занимает особое место. Следуя результатам палеоклиматических исследований далёкого прошлого, современный этап климатической истории Земли охватывает самый короткий Четвертичный геологический период, который начался 2.588 миллионов лет назад и продолжается в настоящее время. В этом геологическом периоде с 800 тыс. лет назад можно выделить циклы оледенений длительностью около 100 тысяч лет, за которыми следуют межледниковые циклы длительностью 10-15 тысяч лет каждое [1]. Возможно, причина для тёплого и длительного межледниковья (Голоцен) состоит в том, что эффект влияния на климат изменяющегося во времени расстояния Земли от Солнца, который сообщает многое о теории Миланковича, является только одним из факторов, которые являются важными в изменении климата.

Окончание последнего ледникового цикла оценивается около 10-12 тысяч лет назад, но остаётся неопределённость о начале следующего ледникового цикла. Потепления и похолодания многократно имели место в прошлом и должны повторяться в будущем. Для успешного прогнозирования будущих изменений климата необходима информация о состоянии окружающей среды на протяжённых временных интервалах.

Эволюция жизни на Земле началась с момента появления первого живого существа – около 3,9 миллиардов лет назад [2]. С примерно 542 миллионов лет назад (фанерозойский эон) наступило время повсеместного и ярко выраженного присутствия на планете развитой растительной и животной жизни [3]. Большая изменчивость климата в Фанерозое характеризуется чередованием умеренно тёплых и холодных интервалов длительного периода [4].

Следует отметить, что последний этап геологического развития Земли, приведший ее к современному состоянию, приходится на кайнозойскую эру, продолжающуюся с 66 млн. лет назад до настоящего времени, в которой произошли геологические процессы, сформировавшие материковый и океанический современный облик. Кайнозойская эра вначале характеризовалась теплым климатом. В кайнозойскую эру произошли весьма знаменательные события: появление человека и становление человеческого общества. В работе [5] представлены данные высокого разрешения астрономически датированных данных измерений содержания изотопов бенгтосного углерода и кислорода за последние 66 миллионов лет. Из анализа данных следует вывод о ключевой роли объема полярного льда в предсказуемости динамики кайнозойского климата.

Нельзя не отметить, что в последнее время климат стал резче меняться, быстрее происходит сокращение площади льдов. Понимание причин изменчивости климата позволит лучше прогнозировать изменения климата в будущем. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) – орган ООН по оценке научных данных, связанных с изменением климата, регулярно представляет отчеты, напр., [6]. Следует отметить, что во всех оценочных докладах МГЭИК используется один и тот же подход для получения выводов и определения степени достоверности – антропогенный фактор, с которым и связывают наблюдаемое в настоящее время потепление.

Встаёт вопрос о будущих изменениях климата после окончания наблюдаемого потепления климата. Внести ясность в споры о причинах нынешнего глобального потепления и получить более полное представление о будущей тенденции изменения климата могут помочь анализы различных прокси данных, например, одноклеточные организмы: фораминиферы в отложениях морей и океанов, охватывающие разные временные интервалы.

В данной работе представлен анализ данных по изменению климата на временном интервале Фанерозоя.

Реконструкции температуры Фанерозоя, основанные на геологических и изотопных данных седиментологии и палеоэкологии

Проанализируем имеющиеся данные по долгосрочным изменениям климата в течение Фанерозоя.

Одна из первых реконструкций палеотемператур на интервале Фанерозоя, предполагающих чередование ледниковых периодов и сравнительно более теплых периодов, полученные по результатам геологических данных, представлена в книге [4].

На рис. 1 представлены результаты реконструкций палеотемператур Фанерозоя и ряда факторов, влияющих на климат в указанном интервале времени, выполненные различными исследователями.

В статье [10] показано, что многопрофильный и междисциплинарный подход, основанный на знаниях, полученных из различных областей науки, представляет собой способ решения этой глобальной и сложной проблемы, вызванной изменением климата. Обсуждается отсутствие связи между различными областями знаний, завершаясь необходимостью взаимосвязи между различными областями знаний как решения для поиска мер по решению проблемы, и, прежде всего, для глобального и комплексного понимания изменения климата. Отметим, что в данной статье прослежена связь между изменением средней температуры поверхности Земли за последние 500 миллионов лет и наиболее существенными причинами изменения климата в этом временном интервале.

Результаты исследований [11] и [12] дают всестороннюю и количественную оценку того, как глобальные температуры изменились за последние 540 миллионов лет ((Fig. 1c). Глобальная температурная модель, представленная в статье [12], включает оценки средней глобальной умеренной температуры, изменяющихся тропических температур, глубинных океанических температур и полярных температур, что позволяет глубже понять взаимосвязанные геологические, тектонические, палеоклиматические, палеоокеанографические и эволюционные события, влиявшие на прошлую температуру Земли. История глобальных изменений температуры в течение Фанерозоя была обобщена в «палеотемпературной шкале времени», которая подразделяет многие прошлые климатические события на 8 основных климатических режимов, каждый из которых стоит из 3–4 пар эпизодов потепления и похолодания. Описано, как эти прошлые температурные события были затронуты геологическими процессами, такими как извержение крупных магматических провинций (потепление) и удары болидов (похолодание).

Таким образом, количественно описывая закономерности изменения палеотемпературы с течением времени, мы можем получить важные све-

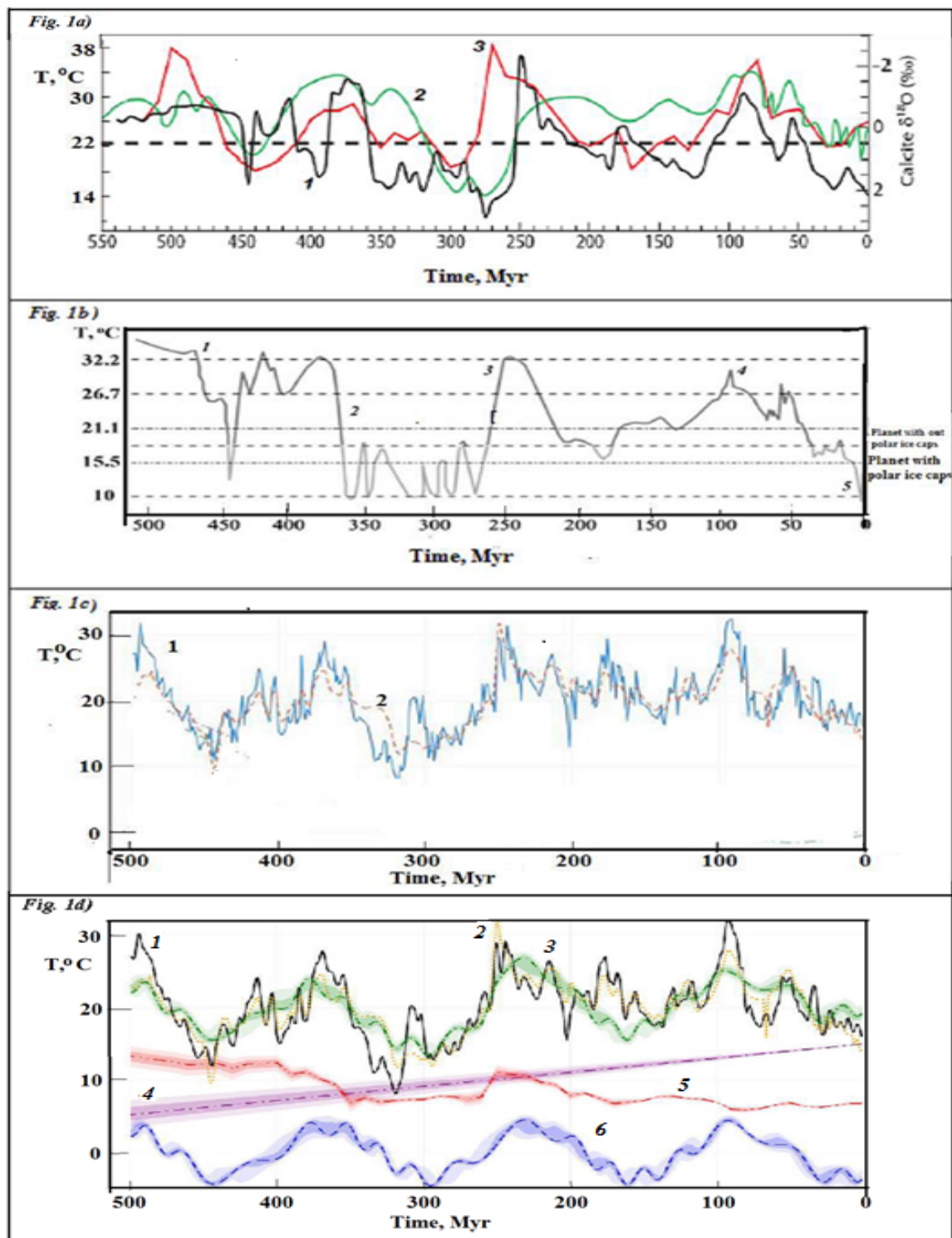


Fig. 1a). Реконструкции средней глобальной температуры Фанерозоя: чёрная кривая (1) построена на основе геологических данных и изотопных исследований [7]; зеленая кривая (2) – на основе данных седиментологии и палеоэкологии [4, 8]. Красная кривая (3) показывает уровни кальцита $\delta^{18}\text{O}$ в тропических морских мелководьях [9] (правая шкала).

1b). Результаты измерений средней температуры поверхности Земли за последние 500 млн. лет и наиболее существенные воздействия, связанные с изменением климата в этом временном интервале [10]. Цифры указывают на: **1** – разнообразие морской жизни в условиях сильной жары; **2** – период до того, как наземные растения поглотили CO_2 и сформировались полярные ледяные шапки; **3** – изменение уровня CO_2 в результате вулканической активности и эрозии почвы; **4** – эволюционирование млекопитающих в более теплые периоды; **5** – влияние человека на потепление климата.

1c). Сравнение реконструкций температуры: **1** – комбинированная реконструкция (сплошная линия), основанная на литологических и геохимических данных для долговременных масштабов и данных по изотопам кислорода для средневременных масштабов (10–20 млн. лет назад) [11]; **2** – реконструкция температуры [12] (пунктирная линия).

1d). Средняя глобальная температура в Фанерозое и климатические факторы, влияющие на климат: **1** – комбинированная геохимическая/литологическая реконструкция (сплошная линия) [11]; **2** – реконструкция (пунктирная линия) [12]; **3** – смоделированная температура (штрихпунктирная зеленая линия). Дополнительные графики представляют собой различные компоненты модели: **4** – увеличение солнечной светимости (штрихпунктирная линия, фиолетовый цвет); **5** – CO_2 (штрих-двойная точечная линия); **6** – ионизация атмосферы (пунктирная линия), заштрихованные области – 1 σ и 95% – области доверительной ошибки на основе геологических данных и изотопных исследований.

дения об истории земной системы и фундаментальных причинах изменения климата в геологических временных масштабах. Это может помочь лучше понять проблемы, связанные с будущим глобальным изменением климата.

Среди учёных до сих пор нет единого мнения, объясняющего те процессы, которые происходят в настоящее время с климатом на Земле. Спорные выводы о доминировании парникового эффект в современном глобальном потеплении получены на основе моделей климата.

Климатические модели не могут объяснить огромную тепловую аномалию 2023 года [13]. С учетом всех известных факторов, в прошлом году планета нагрелась на 0,2°C больше, чем ожидали ученые-климатологи. Срочно необходимы дополнительные и более качественные данные.

Чтобы понять тенденцию изменения климата после окончания современного межледникового, в статье [14] рассмотрены долгосрочные тенденции изменения климатических характеристик на интервалах в сотни и десятки миллионов лет в различных регионах Антарктиды, а также изменение климата после окончания последнего ледникового периода и современные изменения климата, которые указывают на замедление процесса потепления в Антарктическом регионе, но дальнейшее тенденции изменения климата остаются неясными.

Из результатов, представленных на рисунках, нельзя сделать однозначного вывода о резком наступлении похолодания после окончания современного межледникового периода, хотя тренд глобальной температуры на последнем рисунке указывает на снижение температуры. В настоящее время мы, по-видимому, проходим фазу максимального потепления.

Междисциплинарный подход представляет собой подход, который может внести наиболее всесторонний вклад в представление глобальных решений, с вкладом всех областей знаний, оформленных в рамках научного метода.

Литература

1. *Jouzel J. et al.* // Science. 2007. V. 317(5839). P. 793-796.
doi: 10.1126/science.1141038.
2. *Futuyma D.J.* Evolution, Published by Sinauer Associates Inc. – 2005. 543 pp. ISBN 0-87893-187-2.
3. *Zachos J. et al.* // Science. 2001. V. 292 (5517). P. 686–693.
doi:10.1126/science.10594126.
4. *Frakes, L.* // Climates throughout geologic time, Amsterdam, New York: Elsevier Scientific Publishing Company – 1979. 310 pp.
5. *Westerhold T. et al.* // Science. 2020. V. 369(6509). P. 1383-1387.
doi:10.1126/science.aba6853.
6. IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: //Climate Change, P. 1-34. 2023.
doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
7. *Scotese, C.R., & Wright, N.M.* (2018). PALEOMAP Paleodigital Elevation Models (PaleoDEMS) for the Phanerozoic [Data set]. Zenodo.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.5460860>. 2018.
8. *Frakes L.A. et al.,* //Climate modes of the Phanerozoic: The history of the Earth's climate over the past 600 million years. Cambridge: Cambridge University Press. – 1992. 286pp.
9. *Veizer et al.* // Nature. 2000. V. 408(6813). P. 698–701.
<https://doi.org/10.1038/35047044>.
10. *Nunes L.J.R., Ferreira Dias M.* // Climate. 2022. 10. 7.
<https://doi.org/10.3390/cli10010007>. 2022.
11. *Shaviv et al.* // Annals of the New York Academy of Sciences. 2023. V. 1519, Issue 1. P. 1-211. <https://doi.org/10.1111/nyas.14920>.
12. *Scotese C.R. et al.* // Earth-Science Reviews. 2021. V. 215, 103503,
doi.org/10.1016/j.earscirev.032021.1035.
13. *Schmidt G.* // Nature. 2024. V. 627(8004). P. 467-467.
14. *Dergachev V.A.* // Geomagnetism and Aeronomy. 2023. V. 63, No. 8, P. 178–185.