

ON THE CAUSES OF CYCLICAL CLIMATE CHANGES

Anisichkin V.F.

Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН, Новосибирск

avf@hydro.nsc.ru

Citation: Anisichkin V.F.2025. On the causes of cyclical climate changes. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 16(3): 112-119.

DOI: 10.18822/edgcc678513

АННОТАЦИЯ

Циклические изменения климата в истории Земли объясняются циклическими поступлениями парниковых газов в атмосферу.

Основной источник тепла в недрах Земли – спонтанный распад радиоактивных элементов, в том числе урана и тория. Увеличение потока тепла из недр к поверхности может вызываться вынужденным делением актиноидов – цепными ядерными реакциями. Слой актиноидов околокритической толщины мог образоваться в результате гравитационной дифференциации веществ по плотности вследствие оседания частиц тугоплавких высокоплотных соединений актиноидов из расплавленного слоя на твердое из-за высокого давления внутреннее ядро Земли.

Возникающие при цепных ядерных реакциях восходящие потоки массы и тепла во внешнем жидком ядре Земли прогревают вышележащие слои. С началом прогрева земной коры и дна океанов из-за разложения газогидратов в атмосферу поступает парниковый газ метан. С прогревом океанов в атмосферу поступает все больше растворенного в воде океанов углекислого газа и паров воды. За счет положительных обратных связей потепление климата запускается и ускоряется. С разуплотнением активного слоя в тепловых конвективных потоках, прекращением цепных ядерных реакций и снижением потока тепла из недр содержание метана в атмосфере падает, все больше углекислого газа растворяется в остывающей воде океанов, влажность атмосферы уменьшается, наступает похолодание климата.

Рассеянные в тепловых конвективных потоках частицы актиноидов начинают вновь оседать на твердое внутреннее ядро Земли. Моделирование климатических циклов, продолжительность которых определяется временем повторного оседания частиц актиноидов в форме диоксида урана, приводит в расчетах к продолжительности одного цикла около 130 тысяч лет. Такая цикличность согласуется с данными по глобальным изменениям климата за последние четыреста тысяч лет, полученными из ледяных кернов Антарктиды.

Примерно 1.5 миллиона лет назад Земля пережила радикальный климатический сдвиг. Планета уже входила в ледниковые периоды и выходила из них каждые 40 тыс. лет. Но потом ледниковые периоды стали контрастнее и длиннее, с увеличивающейся продолжительностью от 90 до 120 тыс. лет, и в целом планета стала холоднее, что не может объясняться циклами Миланковича, длительность которых должна быть относительно постоянна в таких временных масштабах. Миллионы лет назад легкоделящихся изотопов было больше. Возможно, потому, что в прошлом в недрах Земли в разных местах периодически работали два геореактора. Поэтому климатические циклы были приблизительно в два раза короче, менее выражены, и климат был теплее.

Ключевые слова: ядро Земли, геореактор, тепломассоперенос, парниковые газы, изменение климата.

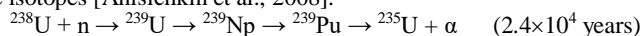
ABSTRACT

Cyclical climate changes in the Earth's history are explained by cyclical inflows of greenhouse gases into the atmosphere.

The main source of heat in the Earth's interior is the spontaneous decay of radioactive elements. An increase in the flow of heat to the surface can be caused by the nuclear chain reactions, forced decay of radioactive elements, including uranium and thorium.

A layer of actinides near a critical thickness can be formed as a result of the deposition of high-melting high-density particles of uranium and thorium oxides from the molten outer core to the solid inner core of the Earth [Mitrofanov et al., 1999]. The upward currents of mass and heat arising during nuclear chain reactions in the Earth's outer liquid core warm up the overlying layers. With the warming of the Earth's crust and the bottom of the oceans, due to the decomposition of gas hydrates, the greenhouse gas methane enters the atmosphere. With heating of the oceans due to positive feedbacks, more and more water vapor and carbon dioxide dissolved in the ocean's water enter the atmosphere. Climate warming is initiating and accelerating.

With the dispersion of the active layer in the thermal convective flows, the stopping of nuclear reactions and a decrease in the heat flow from the interiors occurs, the methane content in the atmosphere decreases. More and more carbon dioxide is dissolved in the cooling water of the oceans. A cold snap is coming. Actinide particles begin to settle on the Earth's inner core again, with parallel reproduction of easily fissionable isotopes [Anisichkin et al., 2008]:



The duration of climatic cycles is determined by the time of sedimentation of actinide particles. Simulation of the process of the whole sedimentation with critical size of uranium dioxide particles and viscosity of the outer core from 10^2 Pa s to 10^9 Pa s leads to a cycle duration of about 130 thousand years, which consistent with the data on climate change over the past 400 000 years obtained from ice cores in Antarctica [Gordienko et al., 1983; Petit et al., 1999; Vimeux et al., 2002].

To start nuclear chain reactions, it is enough to form a layer of actinides of critical thickness, without the sedimentation of all fissile material on the Earth's solid inner core. But the gradual "burnout" of actinides requires more and more complete sedimentation

of actinide particles. Therefore, the duration of cycles should increase over time. Indeed, over the past 400 thousand years, the duration of climatic cycles has increased from approximately 90 to 120 thousand years [Petit et al., 1999; Vimeux et al., 2002].

Approximately 1.5 million years ago, the Earth experienced a radical climate shift. The planet has already entered ice ages and emerged from them every 40 thousand years [Yuzhen et al., 2019; Voosen, 2024; An et al., 2024; Cutts, 2024]. But then the ice ages became more contrasting and longer, with an increasing duration of 90 thousand years to 120 thousand years, and the planet as a whole became colder, which cannot be explained by the changes in the level of insolation – the amount of heat coming from the Sun, Milankovitch cycles, the duration and intensity of which should be relatively constant on the such time scales. Supported nuclear hypothesis explains these rapid climate changes too. Millions of years ago, there were more easily fissile isotopes. It is possible that in the past, two georeactors periodically worked in the Earth's interiors in different places. Therefore, the climatic cycles were approximately twice as short, less pronounced, and the climate was warmer.

Keywords: georeactor, heat and mass transfer, greenhouse gases, climate change.

ВВЕДЕНИЕ

Факторы, влияющие на климат Земли, можно условно разделить на внешние и внутренние. Считается, что основной внешний фактор циклических изменений климата – изменение количества тепла, поступающего от Солнца, из-за изменений солнечной активности и из-за изменений орбиты и параметров вращения Земли (циклы Миланковича) [Milankovitch, 1941; Bolshakov et al., 2015; Barker et al., 2022]. В работе [Fu et al., 2024] рассматривается возможное влияние импактных событий – падений астероидов – на климат Земли. Внутреннюю изменчивость связывают с содержанием в атмосфере Земли парниковых газов: метана (CH_4), диоксида углерода (CO_2) и водяного пара [Van Nes et al., 2015].

Поток тепла из недр Земли к поверхности, определяемый охлаждением ядра Земли и естественным распадом радиоактивных элементов урана, тория и калия, относительно стационарный и поэтому не может быть причиной многократных циклических изменений климата Земли.

Однако даже учет всех известных климатообразующих факторов, но в разных моделях, приводит к существенно разным объяснениям и прогнозам по изменению климата Земли [Hausfather et al., 2022]. К еще большей неточности прогнозов может привести неучёт других процессов, влияющих на климат. Поэтому в работе рассматривается возможное влияние на климат неучитываемого ранее, как следует из обзора [Shaviv et al., 2022], переменного потока радиоактивного тепла из недр Земли.

Ледяной слой в Антарктиде накапливался в течение миллионов лет и местами достигает толщины в несколько километров. Ледяные керны из скважин с разных глубин в пузырьках и растворенными содержат газы, составлявшие атмосферу Земли во время образования очередного слоя льда. Анализ химического и изотопного состава газообразных включений в лед позволил установить связь содержания парниковых газов в атмосфере Земли и температуры до сотен тысяч лет назад [Гордиенко и др., 1983; Petit et al., 1999; Vimeux et al., 2002].

На Рис. приведены взятые из работ [Petit et al., 1999; Vimeux et al., 2002] зависимости циклических изменений температуры в Антарктиде и содержания метана и диоксида углерода в атмосфере в течение последних 400 тыс. лет. Более поздние исследования [Yuzhen et al., 2019] подтвердили соответствие изменений климата и содержания диоксида углерода и метана до 800 тыс. лет назад с увеличивающимся периодом приблизительно от 80 до 120 тыс. лет.

Данные для ледяных кернов возрастом до 2.8 млн лет менее надежны, но установлено, что ранее, 1.5 млн лет назад, продолжительность климатических циклов была существенно меньше, около 40 тыс. лет, менее упорядочена, а климат теплее [Vimeux et al., 2002; Yuzhen et al., 2019; Voosen, 2024; An et al., 2024; Cutts, 2024]. Но так резко частота и характер изменений климата не могут объясняться наиболее популярной теорией – циклами Миланковича, длительность и интенсивность которых должны быть относительно постоянны в таких временных масштабах.

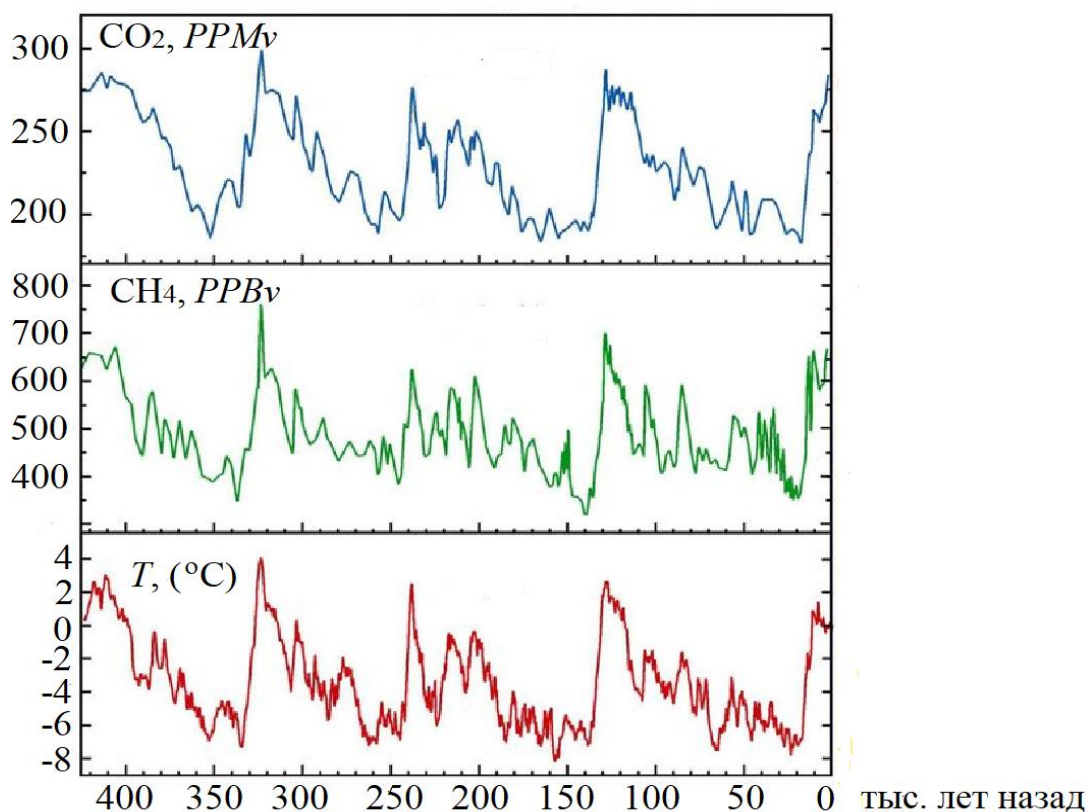


Рис. Циклические изменения объемной концентрации парниковых газов в атмосфере и циклические изменения температуры в Антарктиде [Petit et al., 1999; Vimeux et al., 2002]. CO₂ (PPMv – частей на миллион), CH₄ (PPBv – частей на миллиард).

Fig. Cyclic changes in the volume concentration of greenhouse gases in the atmosphere and cyclic changes of the temperature in Antarctica [Petit et al., 1999; Vimeux et al., 2002]. CO₂ (PPMv – parts per million), CH₄ (PPBv – parts per billion).

Поэтому цель работы – предложить более адекватную, по сравнению с упомянутыми выше и в ссылках, причину циклических изменений климата, обусловленную циклическими поступлениями радиоактивного тепла из недр Земли, циклической работой «геореактора».

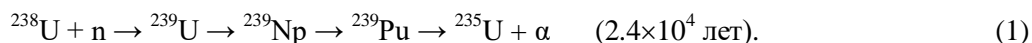
ГЕОРЕАКТОР. ПРИНЦИП РАБОТЫ И МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КЛИМАТ

В [Mitrofanov et al., 1999] экспериментально показано, что диоксид урана (UO₂) при высоких давлениях и температурах не растворяется в расплаве железа и в виде частиц оседает на дно ячейки высокого давления. Следовательно, при гравитационной дифференциации вещества Земли высокоплотные соединения урана и тория, например в виде оксидов, могли оседать из расплавленного слоя на твердое внутреннее ядро Земли. В [Carlson et al., 2009; Luo et al., 2024; Bellini et al., 2013] также приводятся обоснования того, что актиноиды, в отличие от ранее существовавшего мнения, могут в значительных количествах находиться не только в земной коре, но и глубоко в недрах Земли. При этом за сотни миллионов, миллиарды лет после образования жидкого ядра Земли частицы актиноидов могли вырасти до максимально допустимых размеров, ограниченных критической массой. (В рассматриваемой среде более крупные частицы должны расти за счет мелких, так как у крупных частиц меньше удельная поверхность.)

Миллиарды лет назад доля легкоделящихся изотопов урана и тория была достаточной для протекания цепных ядерных реакций. Следы работы природных ядерных реакторов (геореакторов) обнаружены в рудных телах в Окло [Petrov, 1977]. Причем работа таких реакторов возобновлялась неоднократно в импульсном режиме.

В [Anisichkin et al., 2005, 2008; Ershov, Anisichkin, 2003] моделированием получено, что во внешнем жидком железоникелевом ядре Земли при определенных условиях работа геореактора возможна в циклическом импульсном режиме и до настоящего времени, например в нейтронно-

делительной волне [Ershov, Anisichkin, 2003], с последующим циклическим воспроизводством делящихся изотопов [Anisichkin et al., 2005, 2008]:



С образованием активного слоя толщиной около критической и началом цепных ядерных реакций возникают начинающиеся от низа внешнего ядра Земли восходящие потоки массы и тепла, которые через некоторое время, прогревая вышележащую каменную мантию, начинают прогревать кору Земли.

Сравнимое с другими углеводородами количество метана в составе гидратов находится под дном океанов [Kvenvolden et al., 2013], метангидраты обнаружены и на континентах в зонах вечной мерзлоты [Duchkov et al., 2018]. С повышением температуры земной коры происходит высвобождение метана из газогидратов и его поступление в атмосферу. Атмосфера Земли содержит относительно немного парникового газа CO_2 , большая часть которого растворена в воде океанов [Petit et al., 1999]. С повышением температуры океанов растворимость CO_2 в воде уменьшается, все больше поступает в атмосферу CO_2 и водяного пара. Между содержанием парниковых газов в атмосфере и потеплением климата существует положительная обратная связь, что запускает и ускоряет потепление.

В возникших восходящих конвективных потоках первоначально осевшие до образования критического слоя частицы актиноидов перемешиваются с основным веществом ядра Земли, и цепная реакция останавливается. Из-за такого импульсного режима работы геореактора волна тепла из недр ослабевает. Время жизни метана в атмосфере – порядка десяти лет (он окисляется до углекислого газа в атмосфере Земли). Поэтому со снижением выделения из газогидратов концентрация метана в атмосфере быстро падает, начинают работать обратные связи. Температура атмосферы и океанов понижается. Все больше CO_2 растворяется в воде океанов. Поэтому после роста температуры, в исторических масштабах практически без паузы, начиналось похолодание, как на Рис. (В настоящее время очередное похолодание сдерживается, возможно, из-за промышленных выбросов парниковых газов.)

В ослабевающих конвективных потоках в жидком ядре Земли частицы актиноидов начинают вновь оседать с параллельным воспроизводством изотопа ^{235}U по схеме (1), как в реакторах-размножителях. При этом содержание ^{235}U практически не уменьшается, а содержание ^{239}Pu может увеличиваться, как показали расчеты [Anisichkin et al., 2005, 2008]. Так происходит подготовка к следующему климатическому циклу.

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ

Продолжительность климатических циклов можно оценить на основе имеющихся в литературе данных о характеристиках расщепляющихся материалов и характеристиках железоникелевого внешнего жидкого ядра Земли.

Скорость оседания шарообразного тела в жидкости по закону Стокса:

$$v_{oc} = d^2(\rho - \rho_0)g/(18\eta_0), \quad (2)$$

где v_{oc} – скорость оседания частицы, м/с; d – диаметр частицы, м; ρ – плотность частицы, кг/м³; ρ_0 – плотность жидкой фазы, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; η_0 – динамическая вязкость жидкой фазы, Па·с. (Скорость оседания частиц по формуле (2) при принятых характеристиках вещества ядра и частиц актиноидов существенно выше скоростей возможных турбулентных течений во внешнем жидком ядре Земли [Livermore et al., 2017], и поэтому течения несущественно влияют на время оседания частиц.)

Кристаллизуясь, соединения актиноидов не могут образовать тела больше критического размера. Критическая масса шарообразного $^{235}\text{UO}_2$ (94% ^{235}U) 110 кг при плотности 11 000 кг/м³ [Bekman, 2010]. С оседанием и повышением давления в недрах Земли плотность частиц растет. Критическая масса M_c из-за сжатия и уменьшения поверхности утечки нейтронов деления уменьшается по закону $M_c \propto \rho^{-2}$ [Bekman, 2010].

Сжимаемость диоксида урана изучена ударно-волновыми методами до давления около 160 ГПа [Marsh, 1980], где для образца с начальной плотностью 10.3 г/см³ приведена зависимость D – скорости ударной волны в образце от массовой скорости U за фронтом. Для более высоких давлений

и начальной плотности 11 г/см^3 ударную адиабату UO_2 можно рассчитать по обобщенной ударной адиабате [Anisichkin, 1979]:

$$D = U + 3.4(\rho_1/\mu_{\text{eff}})^{1/3}U^{1/2} + 9.1(\rho_1/\mu_{\text{eff}})^{2/3}, \quad (3)$$

где D и U в км/с; ρ_1 – плотность перед фронтом ударной волны в г/см^3 ; μ_{eff} – «эффективная» молекулярная масса в г., равная средней массе атомов, входящих в молекулу. При этом давление за фронтом ударной волны $p = \rho_1 D U$, плотность $\rho = \rho_1 D / (D - U)$. Тогда, если аппроксимировать геотерму диоксида урана, основываясь на ударной адиабате (3), то плотность частиц UO_2 при оседании от верха до низа внешнего жидкого ядра Земли растёт от $15\,400 \text{ кг/м}^3$ до $17\,900 \text{ кг/м}^3$.

В результате, учитывая уменьшение поверхности утечки нейтронов деления, получаем, что критический диаметр частиц $^{235}\text{UO}_2$ при оседании должен уменьшаться от 0.19 м до 0.16 м.

Критическая масса $^{239}\text{PuO}_2$ меньше, чем $^{235}\text{UO}_2$, меньше критический размер [Векман, 2010] и меньше относительное содержание диоксида плутония в ядре Земли в настоящее время, согласно расчетам [Anisichkin et al., 2005, 2008]. Поэтому процесс оседания частиц $^{239}\text{PuO}_2$ несущественно влияет на продолжительность основных климатических циклов.

Примем плотность внешнего жидкого железоникелевого ядра Земли и ускорение свободного падения в ядре согласно модели PREM [Dziewonski et al., 1981], по которой плотность меняется с глубиной от $9\,900 \text{ кг/м}^3$ до $12\,200 \text{ кг/м}^3$, ускорение свободного падения – от 10.6 м/с^2 до 4.4 м/с^2 .

Вязкость жидкого железа при высоких давлениях в условиях ядра Земли в литературе оценивается в широких пределах. Так, в обзоре [Brazhkin et al., 2000] вязкость расплава железа обсуждается от 10^2 - 10^4 Па с для верха ядра и до 10^7 - 10^{11} Па с для низа внешнего ядра, и предполагается, что вязкость растёт экспоненциально с ростом давления. При этом отмечается, что наиболее достоверные оценки, основанные на измерении затухания сейсмических волн, дают величину вязкости от 10^4 Па с для верха ядра и до 10^8 Па с для низа внешнего ядра. В обзоре [Mineev et al., 2004] проведен анализ экспериментальных и расчетных работ по вязкости жидкого железа. В результате считается более вероятной вязкость порядка нескольких Па с во всем объеме внешнего ядра. В [Desgranges et al., 2007] методами молекулярной динамики получены величины порядка 10^2 Па с от верха и до низа внешнего ядра с небольшим ростом с давлением.

Наиболее достоверными и согласованными с результатами других авторов представляются данные, приведенные в работе [Smylie et al., 2009] и в работе [Xian et al., 2019]. В [Smylie et al., 2009] вязкость получена от нескольких Па с для верха земного ядра и до 10^{11} Па с у границы с твердым внутренним ядром. В работе [Xian et al., 2019] методами молекулярной динамики вязкость низа внешнего ядра получена около 10^9 Па с.

С учетом приведенных данных и других оценок, представленных в цитированных выше работах, примем в расчетах вязкость вещества внешнего ядра Земли в диапазоне от 10^2 Па с до 10^9 Па с, при экспоненциальном росте с давлением.

Подставляя в (2) принятые изменения значения величин, в зависимости от глубины оседания, численно интегрируя от верха до низа внешнего ядра Земли, с переменным шагом по глубине оседания, получаем время полного оседания частиц UO_2 около 130 тыс. лет. (Этот результат означает, что климатические циклы могли быть короче, но не могут быть продолжительнее 130 тыс. лет.)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из-за железа – отражателя нейтронов и нейтронов от соседних частиц критический размер частиц в расчетах должен быть меньше принятого, и время полного оседания актиноидов больше. С примесью ^{238}U критический размер частиц UO_2 больше, чем в случае чистого ^{235}U , что приводит в расчетах к сокращению климатических циклов. Действуя противоположно, эти факторы в сумме несущественно влияют на результаты.

Расчеты показали, что начальное значение вязкости вещества ядра Земли от 10^2 до 10^2 Па с несущественно влияет на результат. Величина вязкости на последней стадии оседания актиноидов, которая остается недостаточно определенной, влияет более существенно, чем другие параметры, на скорость, время оседания частиц и продолжительность климатических циклов. Так, на порядок более высокая вязкость вещества ядра дает в расчетах на порядок более продолжительные климатические циклы.

Для начала цепных ядерных реакций достаточно образования слоя актиноидов критической толщины, без оседания всего делящегося материала на твердое внутреннее ядро Земли. Постепенное

«выгорание», уменьшение абсолютного содержания актиноидов в ядре Земли требует все более полного и, следовательно, более продолжительного оседания частиц актиноидов. Поэтому продолжительность климатических циклов со временем должна увеличиваться. Действительно, согласно данным [Vimeux et al., 2002; Yuzhen et al., 2019; Voosen, 2024; An et al., 2024; Cutts, 2024] и из Рис. видно, что продолжительность климатических циклов за последние сотни тысяч лет увеличилась приблизительно с 90 до 120 тыс. лет.

Миллионы лет назад легкоделящихся изотопов было больше. Возможно, что в прошлом в недрах Земли в разных местах над поверхностью твердого внутреннего ядра, обмениваясь актиноидами благодаря конвективным потокам, периодически работало два геореактора. Поэтому климатические циклы были приблизительно в два раза короче, менее выражены, и климат был теплее [Yuzhen et al., 2019; Voosen, 2024; An et al., 2024; Cutts, 2024].

Рассматривалось глобальное оседание актиноидов. Из-за неоднородности течений в жидком ядре Земли могут образовываться и локальные скопления актиноидов. Выделяемое актиноидами тепло плавит нижележащее твердое ядро, образуя углубление, в которое с поверхности твердого ядра начинают «стекать» более плотные частицы актиноидов. При достижении таким скоплением актиноидов критической толщины в нем начинаются цепные ядерные реакции, вызывая менее масштабные, чем глобальные, изменения магнитного поля и климата. Но характер изменений климата за последние сотни тысяч лет говорит о существенно большей активности одного глобального геореактора.

Цепными ядерными реакциями и воспроизводством делящихся изотопов по схеме (1) с выделением α – частиц, ядер атомов гелия, более адекватно может объясняться относительно высокое содержание гелия в благородных газах, поступающих из недр Земли, в отличие от гипотезы, приведенной, например, в работе [Vočadlo et al., 2022].

Регистрируемыми предвестниками грядущих изменений условий на поверхности Земли может быть увеличение потока электронных антинейтрино от реагирующих актиноидов и изменение магнитного поля Земли. Естественно, возникает вопрос: через какое время процессы в ядре Земли могут сказаться на климате, чтобы заблаговременно к этому подготовиться?

Время передачи тепла из ядра Земли к поверхности определяется как конвективным, так и кондуктивным теплопереносом. Если принять максимальную скорость потоков во внешнем жидком ядре Земли порядка нескольких десятков километров в год [Livermore et al., 2017], то для переноса тепла от низа до верха внешнего ядра может потребоваться время не менее 10^3 лет. Через каменную оболочку Земли наиболее быстро тепло может переноситься мантийными плюмами. В работе [Kirdyashkin et al., 2013] с учетом ранее проведенных исследований принимается время подъема плюма от низа мантии до поверхности порядка 10^6 лет.

Приближенно оценить время кондуктивной передачи тепла через каменную мантию Земли можно по закону Фурье для стационарной теплопроводности:

$$t = Qh/\lambda\Delta T, \quad (4)$$

где t – продолжительность процесса теплопроводности; Q – необходимое для начала потепления количество теплоты; h – толщина каменной оболочки Земли; λ – коэффициент теплопроводности для каменной мантии; ΔT – прирост температуры низа мантии вследствие работы геореактора. Если принять условия теплопередачи возможно наиболее оптимальными, например, ΔT равным тысяче градусов и необходимым нагрев воды океанов, для запуска потепления, на один градус, то потребуется время передачи тепла через мантию Земли порядка 10^6 лет. Но следует отметить, что время задержки потепления может существенно зависеть от степени глобальности, интенсивности, продолжительности цепных реакций, температуры восходящих тепловых потоков в ядре Земли, величины необходимого для запуска потепления нагрева воды океанов и земной коры. Поэтому значение t по формуле (4) может меняться на 1-2 порядка. Такой временной лаг не позволяет достоверно сопоставить инверсии магнитного поля Земли и глобальные изменения климата в далеком прошлом. Кроме того, изменения интенсивности магнитного поля Земли необязательно должны быть инверсиями, которые регистрируются по остаточной намагниченности пород.

Если исходить из цикличности процессов, приведенных на рисунке, то в настоящее время климат на Земле близок к максимально теплему. Далее возможно глобальное похолодание. Поэтому если не восполнять предстоящую естественную циклическую убыль парниковых газов в атмосфере, то на Земле наступит очередной ледниковый период. К этому следует отметить, что если полученная

в расчетах максимально возможная продолжительность климатического цикла завышена и составляет не 130 тыс. лет, а, например, около 120 тыс. лет, то очередного потепления после ледникового периода может и не случиться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе [Rusov et al., 2007] мощность возможно действовавшего геореактора в ядре Земли предполагается порядка 10^{13} Вт. В [Kirdyashkin et al., 2013] минимальная мощность источника, при которой выносящий из ядра Земли тепло плюм еще выходит на поверхность, порядка 10^{10} Вт. Согласно работе [Bellini et al., 2013] по мониторингу геонейтрино, в настоящее время мощность геореактора не превышает 4.5 ТВт. Следовательно, в настоящее время геореактор находится в относительно спокойном, длительном режиме накопления и концентрации легкоделящихся изотопов.

Глобально и в длительной временной перспективе температура на поверхности планеты зависит от количества тепла, поступающего от Солнца. Но процессы на поверхности и в недрах планеты могут существенно влиять на степень «усвоения» солнечной энергии. Так, облачность, размер полярных ледяных «шапок» планеты, вулканическая пыль в атмосфере влияют на отражательную способность атмосферы. Влияют на климат и индустриальные выбросы.

Поэтому предложенную гипотезу следует рассматривать во взаимосвязи с другими известными и возможными климатическими факторами [Shaviv et al., 2022]. Но причину и продолжительность современных климатических циклов гипотеза «геореакторов» объясняет более адекватно.

ЛИТЕРАТУРА

- An Z., Zhou W., Zhang Z., Zhang X., Liu Z., Sun Y., Clemens S.C., Wu L., Zhao J., Shi Z., Ma X., Yan H., Li G., Cai Y., Yu J., Sun Y., Li S., Zhang Y., Stepanek C., Lohmann G., Dong G., Cheng H., Liu Y., Jin Z., Li T., Hao Y., Lei J., Cai W.I. 2024. Mid-Pleistocene climate transition triggered by Antarctic Ice Sheet growth. *Science* 385: 560-565.
- Anisichkin V.F. 1979. Generalized Shock Adiabats and Zero Isotherms of Elements. *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 15(2): 245-250.
- Anisichkin V.F., Bezborodov A.A., Suslov I.R. 2005. Nuclear fission chain reactions of nuclides in the Earth's core over billions of years. *Atomic Energy* 98(5): 352-360.
- Anisichkin V.F., Bezborodov A.A., Suslov I.R. 2008. Georeactor in the Earth. *Transport Theory and Statistical Physics* 37(5): 624-633.
- Barker S., Starr A., Van der Lubbe J., Doughty A., Knorr G., Conn S., Lordsmith S., Owen L., Nederbragt A., Hemming S., Hall I., Levay L. 2022. IODP Exp. 361 Shipboard Scientific Party. Persistent influence of precession on northern ice sheet variability since the early Pleistocene. *Science* 376(6596): 961-967.
- Bekman I.N. 2010. *Nuclear physics. Course of lectures Tutorial*. Lomonosov Moscow State University. Moscow (in Russian). [Бекман И.Н. / Ядерная физика. Курс лекций. Учебное пособие. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Москва. 2010.]
- Bellini G., Benziger J., Bick D., Bonfini G., Bravo D., Avanzini M.B., Caccianiga B., Cadonati L., Calaprice F., Cavalcante P., Chavarria A., Chepurnov A., D'Angelo D., Davini S., Derbin A., Empl A., Etenko A., Fiorentini G., Fomenko K., Franco D., Galbiati C., Gazzana S., Ghiano C., Giammarchi M., Goeger-Neff M., Goretti A., Grandi L., Hagner C., Hungerford E., Ianni Aldo, Ianni Andrea, Kobychiev V.V., Korablev D., Korga G., Koshio Y., Kryn D., Laubenstein M., Lewke T., Litvinovich E., Loer B., Lombardi P., Lombardi F., Ludhova L., Lukyanchenko G., Machulin I., Manecki S., Maneschg W., Mantovani F., Manuzio G., Meindl Q., Meroni E., Miramonti L., Misiaszek M., Mosteiro P., Muratova V., Oberauer L., Obolensky M., Ortica F., Otis K., Pallavicini M., Papp L., Perasso L., Perasso S., Pocar A., Ranucci G., Razeto A., Re A., Ricci B., Romani A., Rossi N., Sabelnikov A., Saldanha R., Salvo C., Schönert S., Simgen H., Skorokhvatov M., Smirnov O., Sotnikov A., Sukhotin S., Suvorov Y., Tartaglia R., Testera G., Vignaud D., Vogelaar R.B., von Feilitzsch F., Winter J., Wojcik M., Wright A., Wurm M., Xu J., Zaimidoroga O., Zavatarelli S., Zuzel G. 2013. Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino. *Physics Letters B* 722: 295-300.
- Bolshakov V.A., Fedin V.A. 2015. Orbital factors of impact on the Earth's cryosphere (on the example of Antarctic core analysis). *Cryosphere of the Earth* 19(2): 87-97 (in Russian). [Большаков В.А., Федин В.А. Орбитальные факторы воздействия на криосферу Земли (на примере анализа антарктических кернов) // Криосфера земли. 2015 19(2): 87-97
- Brazhkin V.V., Lyapin A.G. 2000. Universal viscosity growth in metallic melts at megabar pressures: the vitreous state of the Earth's inner core. *Physics-Uspekhi* 43(5): 493-509.
- Carlson R.W., Boyet M. 2009. Short-lived radionuclides as monitors of early crust-mantle differentiation on the terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters* 279: 147-156.
- Cutts E. 2024. Oldest ice offers view of Earth before the ice ages. *Science* 384(6694): 368-369.
- Desgranges C., Delhommelle J. 2007. Viscosity of liquid iron under high pressure and high temperature: Equilibrium and nonequilibrium molecular dynamics simulation studies. *Physical Review B* 76: 172102-1-172102-4.
- Duchkov A.D., Sokolova L.S., Zheleznyak M.N., Ayunov D.E. 2018. On the issue of prospecting for methane hydrate deposits in the areas of cryolithozone distribution. *Geophysical technologies* (in Russian). [Дучков А.Д. и др. К вопросу о поисках месторождений гидратов метана в областях распространения криолитозоны // Геофизические технологии. 2018. № 2. С. 27-40].

- Dziewonski A.M., Anderson D.L. 1981. Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 25(4): 297-356.
- Ershov A.P., Anisichkin V.F. 2003. Natural Neutron-Fission Wave. *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 39(2): 226-231.
- Fu M., Abbot D.S., Koeberl C., Fedorov A. 2024. Impact-induced initiation of Snowball Earth: A model study. *Science Advances* 10(6): 8 DOI: 10.1126/sciadv.adk5489.
- Gordienko F.G., Kotlyakov V.M., Korotkevich E.S., Barkov N.I., Nikolaev S.D. 1983. New results of oxygen isotope studies of ice core from a borehole at Vostok station to a depth of 1412 m. *Materials of glaciological studies* 46: 168-171 (in Russian). [Гордиенко Ф.Г., Котляков В.М., Короткевич Е.С., Барков Н.И., Николаев С.Д. 1983. Новые результаты изотопно-кислородных исследований ледяного керна из скважины со станции Восток до глубины 1412 м. *Материалы гляциологических исследований*. № 46. С. 168-171].
- Hausfather Z., Marvel K., Schmidt G.A., Nielsen-Gammon J.W., Zelinka M. 2022. Climate simulations: recognize the 'hot model' problem. *Nature* 605: 26-29.
- Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G. 2013. Interaction of a thermochemical plume with free convection mantle flows and its influence on mantle melting and recrystallization. *Russian Geology and Geophysics* 54(5): 707-721 (in Russian). [Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. Взаимодействие термохимического плюма с мантийными свободно-конвективными течениями и его влияние на плавление и перекристаллизацию мантии. *Геология и геофизика*. 2013. 54(5): 707-721
- Kvenvolden K.A., Lorenson T. 2013. The Global Occurrence of Natural Gas Hydrate. *Geophysical Monograph Series*. In book: *Natural Gas Hydrates*. DOI: 10.1029/GM124p0003.
- Livermore P.W., Hollerbach R., Finlay C. 2017. An accelerating high-latitude jet in Earth's core. *Nature Geoscience* 10: 62-68.
- Luo H., O'Rourke J.G., Deng J. 2024. Radiogenic heating sustains long-lived volcanism and magnetic dynamos in super-Earths. *Science Advances* 10: ead07603.
- Marsh S.P. (Editor). 1980. *ASL Shock Hugoniot Data*. University of California Press.
- Milankovitch M. 1941. Kanon der Erdbestrahlungen und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. *Royal Serbian Academy. Section of Mathematical and Natural Sciences*. Belgrade 33.
- Mineev V.N., Funtikov A.I. 2004. Viscosity measurements on metal melts at high pressure and viscosity calculations for the Earth's core. *Physics–Uspekhi* 47(7): 671-686.
- Mitrofanov V.V., Anisichkin V.F., Voronin D.V., Zhilin A.A., Fedorov A.V., Kryukov B.P., Turkin A.I. 1999. On the possibility of explosive nuclear energy release in the planets Interiors. In: *Proceedings of the International Conference V Zababakhin Scientific Talks*. Snezhinsk. Publishing House RFNC-VNIITF. P. 67-76 (in Russian). [Митрофанов В.В. и др. О возможности взрывного ядерного энерговыделения в недрах планет. Труды Международной конференции V Забабахинские научные чтения. Снежинск. Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ. 1999. С. 67-76.]
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399: 429-436.
- Petrov Yu. V. 1977. Natural nuclear reactor at Oklo. *Uspehi Fizicheskikh Nauk* 123(3): 473-486.
- Rusov V.D., Pavlovich V.N., Vaschenko V.N., Tarasov V.A., Zelentsova T.N., Bolshakov V.N., Litvinov D.A., Kosenko S.I., Byegunova O.A. 2007. Geoantineutrino spectrum and slow nuclear burning on the boundary of the liquid and solid phases of the Earth's core. *Journal of Geophysical Research* 112: b09203.
- Shaviv N.J., Svensmark H., Veizer J. 2022. The Phanerozoic climate. *Annals of the New York Academy of Sciences*. Vol. 1519. Is. 1. P. 7-19.
- Smylie D.E., Brazhkin V.V., Palmer A. 2009. Direct observations of the viscosity of Earth's outer core and extrapolation of measurements of the viscosity of liquid iron. *Physics–Uspekhi* 52(1): 79-92.
- Van Nes E., Scheffer M., Brovkin V., Lenton T., Ye H., Deyle E., Sugihara G. 2015. Causal feedbacks in climate change. *Nature Climate Change* 5: 445-448.
- Vimeux F., Cuffey K.M., Jouzel J. 2002. New insights into Southern Hemisphere temperature changes from Vostok ice cores using deuterium excess correction. *Earth and Planetary Science Letters* 203: 829-843.
- Vočadlo L., Ballentine C., Brodholt J.P. 2022. Primitive noble gases sampled from ocean island basalts cannot be from the Earth's core. *Nature Communications* 13(1): 3770.
- Voosen V. 2024. Sharp shift in ice age rhythm pinned to carbon dioxide. *Science* 383(6685): 805-806.
- Xian J.-W., Sun T., Tsuchiya T. 2019. Viscoelasticity of liquid iron at conditions of the Earth's outer core. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 124: 11105-11115.
- Yuzhen Y., Bender M.L., Brook E.J., Clifford H.M., Kemeny P.C., Kurbatov A.V., Mackay S., Mayewski P.A., Ng J., Severinghaus J.P., Higgins J.A. 2019. Two-million-year-old snapshots of atmospheric gases from Antarctic ice. *Nature* 574: 663-666.

Поступила в редакцию: 13.04.2025

Переработанный вариант: 15.09.2025

Принято в печать: 30.09.2025

Опубликована: 18.11.2025¹

¹ Несмотря на то, что статья была подана в раздел «Дискуссии» (для которого рецензирование по умолчанию не предполагается), автор просил редакцию обеспечить ее рецензирование. В связи с этим данная статья проходила рецензирование в обычном порядке и после переработки была рекомендована к печати независимыми рецензентами. – Примечание редактора.