

A CRITICAL MULTIDISCIPLINARY VIEW ON THE SPECULATIVE HYPOTHESIS OF DEEP-EARTH GEOREACTOR AND ITS IMPACT ON THE GLOBAL CLIMATE

Ustinov N.B.

Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва

nikustinov@ifaran.ru

Citation: Ustinov N.B. 2025. A critical multidisciplinary view on the speculative hypothesis of deep-earth georeactor and its impact on the global climate. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 16(3): 120-133.

DOI: 10.18822/edgcc695943

АННОТАЦИЯ

В научной литературе продолжают циркулировать различные гипотезы, идущие вразрез с общепринятыми представлениями о причинах изменения климата Земли. Попытки пересмотра господствующей климатической парадигмы до недавнего времени сводились к тому, что антропогенный фактор глобального потепления недооценивался либо вовсе отрицался, а роль природных климатических циклов, связанных с неравномерным поступлением тепла от Солнца, абсолютизировалась. Концепция глубинного импульсного геореактора, критически рассматриваемая в данной дискуссионной статье, претендует на еще более глубокую ревизию устоявшихся положений современной климатологии, связывая эти циклы не с повторяющимися изменениями параметров оси и орбиты Земли (циклами Миланковича), а с периодическим протеканием цепных ядерных реакций в недрах нашей планеты.

В статье доказывается, что специфика дифференциации вещества Земли в процессе планетогенеза не могла обеспечить сверхкритического концентрирования долгоживущих изотопов актиноидов (урана и тория) ни на границе твердого и жидкого земных ядер, ни в мантийной толще. Кроме того, для запуска геореактора необходим целый ряд дополнительных условий, которые в последний раз могли сложиться около 2.0 млрд лет назад в осадочном слое земной коры и никогда бы не сложились в глубинных слоях планеты. Если же такой геореактор и мог бы функционировать, то радиогенное тепло от его работы не передалось бы в кору без критических потерь за геологически приемлемый промежуток времени.

В статье также подвергается сомнению возможность массированного высвобождения парниковых газов из их природных резервуаров в атмосферу при гипотетическом увеличении геотермального потока из земных недр. На примере газогидратов метана показано, что их дестабилизация требует экстремального повышения температуры в зоне их залегания под океаническим дном, а донные осадки и вышележащая водная толща играют роль буфера, утилизируя высвобождаемый из газогидратов метан до его попадания в атмосферу.

Таким образом, концепция глубинного импульсного геореактора, якобы существующего и определяющего климат Земли, покоится на множестве допущений, противоречащих данным сразу нескольких научных дисциплин, начиная от геохимии и заканчивая климатологией.

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

ABSTRACT

Scientific literature is overwhelmed by hypotheses claiming to disprove generally accepted ideas about the causes of climate change. Until recently, a vast majority of climate revisionists just forced themselves not to consider human activity as a driving force of global warming, while the role of natural climate cycles has been overemphasized.

The concept of naturally emerged georeactor operating in a pulse mode brings us to the next level of climate revisionism. Authors of this hypothesis dare to associate cyclic climate changes with the repetitive occurrence of nuclear fission reactions in the deep Earth's interior rather than with long-term variations in Earth's orbit and axial tilt, commonly referred to as the Milankovitch cycles [Milankovitch, 1941]. A proposed operating cycle of hypothetical deep-Earth georeactor includes: 1) exsolution of actinide (uranium (U) and thorium (Th)) particles from iron melt in the Earth's outer liquid core; 2) deposition of these particles onto the inner solid core; 3) initiation of nuclear fission as the actinide layer reaches a critical thickness; 4) termination of fission due to the dispersion of fissionable material within liquid core; 5) re-deposition of actinide particles onto the inner-outer core boundary and so on.

It was speculated that the alternation of glacial and interglacial periods in the Earth's geological history is synchronized with georeactor operating cycles. According to this hypothesis's proponents, radiogenic heat from nuclear fission is transferred through the silicate rock mantle and warms the Earth's crust, thereby triggering a

massive release of carbon-containing greenhouse gases (GHG) from their natural reservoirs and subsequent global temperature increase. Although other georeactor concepts have been proposed in the literature before [Herndon, 1993; Rusov et al., 2007; Anisichkin et al., 2008; Ludhova et al., 2015; Meijer & van Westrenen, 2008], none of them suggested a pulsed mode of operation or considered the possible influence of radiogenic heat production on the Earth's climate.

As demonstrated in this discussion paper, the feasibility of nuclear fission reactions in the deep Earth's interior should be rejected for geochemical reasons, and the core georeactor hypothesis described above is the easiest to disprove. Being refractory lithophile elements, U and Th should have been partitioned into the primitive mantle rather than into the core during metal-silicate segregation in the magma ocean (MO) stage of Earth's evolution [McDonough & Sun, 1995]. They are considered to form oxides at the mantle conditions, whereas their residual amounts appeared as pure metals within the core. Partitioning experiments in the laser-heated diamond anvil cell performed at high pressure-temperature conditions relevant to primordial MO have shown that no more than 2.5-3.5 ppb U could be dissolved in iron melt during liquid core formation [Chidester et al., 2017; Blanchard et al., 2017]. Such trace amounts of U tended to be further segregated into solid inner core as it crystallized.

Once exsolved from the liquid portion of the core, U has been irreversibly incorporated into the solid one as pure grains and/or point defects in crystalline Fe. This scenario, confirmed by density functional theory calculations, rules out any chance for U particles to form a layer of critical thickness on the inner-outer core boundary [Botana et al., 2025]. Although such experimental and theoretical evidences are lacking for thorium, Th and U concentrations in the newly formed liquid core should have been of the same order due to the comparable values of metal-silicate partition coefficients [Faure et al., 2020]. Since both these elements are characterized by very low solubility in molten iron, Th was expected to exsolve from the remaining liquid core portion in the same manner as U. Thus, almost negligible content of actinides within the Earth's core, along with their irreversible incorporation into its solid portion, leaves no room for the concept of core georeactor operating in a pulse mode, but what about the bulk of them segregated into the molten silicate phase during MO differentiation?

The current U and Th content in bulk silicate Earth (mantle plus crust, BSE) was estimated to be ~20 and ~80 ppb, respectively. Extrapolation of these values back to 4.5 Ga (the age of core-mantle differentiation) would result in ~54 ppb U and ~99 ppb Th in initial BSE (primitive mantle before crust formation). Such decrease in the concentration of these elements is due to their radioactive decay with time. Low relative abundances of actinides in initial BSE, constrained by the composition of chondritic meteorites regarded as the main building blocks of the Earth, did not allow for U and Th oxides to crystallize from silicate melt as pure phases. Instead of such crystallization, these oxides were prone to be incorporated into the lattice of mantle silicate minerals such as CaSiO₃ perovskite (Ca-perovskite) [Gautron et al., 2006; Gréaux et al., 2009]. Apart from other conditions required for the initiation and sustained operation of hypothetical mantle georeactor, there should exist concentration factors of several orders of magnitude to reach criticality without the formation of distinct mineral phases by actinide compounds.

First of all, U and Th oxides are thought to reside in the lowermost part of the mantle (so-called D'' layer) which comprises 5 wt% (percentage by weight) of initial BSE and is almost unaffected by convective processes [Tolstikhin et al., 2006]. Assuming that D'' layer stores one-fifth of the total BSE inventory of actinides, we easily concluded that this geochemical reservoir must be enriched with U and Th by a factor of four. Then, these elements have been found to be incorporated much more readily (by a factor of 104-105) into the crystal lattice of Ca-perovskite than of the other lowermost mantle minerals (ferropericlase and post-perovskite) [Walter et al., 2004; Corgne et al., 2005]. Since Ca-perovskite phase constitutes only ~5 wt% of D'' layer, a further 20-fold enrichment in actinides was to be achieved.

The resulting concentration factor of ~80 corresponds to ~4.3 ppm U and ~7.9 ppm Th upon the formation of Ca-perovskite reservoir within D'' layer. These values are still several orders of magnitude less than those required for georeactor initiation. If we take into account the presence of plutonium (Pu) and its role as a source of fast neutrons, criticality conditions for nuclear fission to occur could be met at much smaller local concentrations of U and Th, but an additional concentration factor of ~20 is necessary to enable sustained operation of georeactor [Meijer & van Westrenen, 2008]. No such factors have been identified at the lowermost mantle conditions if we leave aside unproven speculations.

Thus, the geochemical fate of actinides provides no room for deep-Earth georeactor to emerge neither in the core nor within the mantle. The only geochemical reservoir where naturally occurring nuclear fission reaction could be initiated is the upper layer of the Earth's crust composed of sedimentary rocks. The differentiation of mantle-derived melts within magma chambers followed by hydrothermal transport of U from enriched residual melts to the upper crust resulted in the formation of U ore deposits.

Spontaneous nuclear fission is permitted to occur only in high-grade ores with U content more than 10 wt%. In addition to this requirement, a number of additional conditions should be met to reach criticality in the rich zone of ore. As for the sandstone-type ore deposits, this zone must be quite thick (> 0.5 m) and chopped up by tectonic faults in order to provide the entry of water acting as a neutron moderator [Naudet, 1991]. All these conditions were satisfied in Oklo deposits (Gabon, South Africa) where the only known natural nuclear reactor on Earth operated ~2.0 Ga ago for ~100 Ma. Since then, there was no chance for such reactors to initiate and operate as the ²³⁵U/²³⁸U ratio became too low to support criticality [Gauthier-Lafaye & Weber, 2003].

Neither deep-Earth georeactors nor Oklo-like natural reactors, even if they existed, wouldn't be able to affect the Earth's heat balance. The power output of the latter (~100 kW) was estimated to be quite negligible compared to the total heat input from the Earth's interior (43-49 TW). According to theoretical estimates, the operation of hypothetical core georeactor would contribute up to 30 TW to geothermal heat flow (GHF) if the radiogenic heat was transferred by mantle convection to the Earth's surface over geologically relevant timescales.

Nevertheless, convective flow velocities correspond to plate tectonic ones and do not exceed 1-10 cm·year⁻¹, although mantle plumes could ascend from the core-mantle boundary two or more orders of magnitude faster (100 cm·year⁻¹) [Bercovici, 2010]. Anyway, these upwelling processes are so slow that excessive radiogenic heat (ERC) must be dispersed into the surrounding mantle rocks instead of being transferred to the Earth's crust. Even if ERC reached the Earth's surface without losses, ERC-induced GHF alterations wouldn't be synchronized with georeactor operating cycles due to the different timescales of heat production and heat transfer.

Moreover, warming of the Earth's crust by enhanced GHF wouldn't have resulted in the release of GHG from their natural reservoirs into the atmosphere, i.e., carbon dioxide from the ocean water column and methane from deep sea gas hydrates (DSGH). As for the latter, it has been shown that DSGH destabilization requires an extreme warming of seafloor (e.g., from 1-2 to 14-15 °C at the depth of 1200 m!) [Ruppel & Kessler, 2017] that couldn't be provided by geothermal activity. Finally, one could only imagine the occurrence of such unrealistic event, but even in this case methane released from DSGH would be oxidized in bottom sediments and the overlying water column before it entered the atmosphere [Reeburgh, 2007].

Thus, the hypothesis of deep-Earth georeactor and its impact on the global climate is based on a multitude of poor assumptions that contradict a number of studies from several scientific disciplines, from geochemistry to climatology.

Key words: Earth's core, georeactor, global warming, climate change, greenhouse gases.

Используемые сокращения

ПГ – парниковые газы;
МО – магматический океан;
ppb – миллиардная доля (по массе);
ppm – миллионная доля (по массе);
ТФП – теория функционала плотности;
ПЭТМ – палеоцен-эоценовый термический максимум.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на выработанный в климатических науках консенсус, в литературе продолжают циркулировать различные гипотезы, идущие вразрез с общепринятыми представлениями о факторах и причинах долгосрочных изменений климата. Авторы таких гипотез в массе своей касаются проблемы глобального потепления, стремясь доказать, что деятельность человека не вносит сколько-нибудь существенного вклада в усиление парниковых свойств земной атмосферы [Björnberg et al., 2017]. Роль климатических макроциклов, связанных с неравномерным поступлением тепла от Солнца, при этом, как правило, не отрицается, а чаще, наоборот, абсолютизируется. Также нередки случаи, когда добросовестные исследователи, не имея ревизионистских амбиций и объективно анализируя реальные последствия глобального потепления (например, деградацию многолетнемерзлых пород), абстрагируются от его антропогенной составляющей [Shpolyanskaya et al., 2022] либо от его причин в целом [Konishchev, 2009].

Статья «О причинах циклических изменений климата» [Anisichkin, 2025], опубликованная в журнале «Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата», претендует на более глубокую ревизию современной климатической парадигмы, чем все предпринимавшиеся ранее попытки такого рода. По мнению авторов статьи, циклические колебания глобальной температуры с периодом 90-130 тысяч лет, проявляющиеся в чередовании оледенений и межледниковий, объясняются не циклами Миланковича, связанными с повторяющимися изменениями параметров земной орбиты и оси Земли [Milankovitch, 1941], а с функционированием импульсного ядерного геореактора в недрах нашей планеты.

Предложенный цикл работы такого реактора включает в себя: 1) кристаллизацию оксидов актиноидов (урана и тория) из железоникелевого расплава во внешнем жидком ядре Земли; 2) их оседание из этого расплава на внутреннее твердое ядро; 3) инициирование цепной ядерной реакции при формировании осевшими частицами слоя критической толщины; 4) остановку

реакции за счет рассеивания частиц в железоникелевом расплаве; 5) повторное концентрирование этих частиц на границе твердого и жидкого ядер и т.д. Авторы статьи предполагают, что тепло, выделяемое при работе геореактора, доходит через мантию до земной коры и прогревает ее. Прогревание более тонкой океанической коры, согласно этому предположению, способствует массивному выделению углеродсодержащих парниковых газов (ПГ) из их естественных резервуаров (метана (CH₄) из глубоководных газогидратных залежей и диоксида углерода (CO₂) из толщи океана), что якобы и приводит к повышению глобальной температуры.

Существование геореакторов в недрах Земли уже неоднократно постулировалось в литературе. Разные авторы пытались обосновать возможность протекания ядерных реакций не только на границе твердого и жидкого ядер [Rusov et al., 2007; Anisichkin et al., 2008], но и в самом твердом ядре [Herndon, 1993; Herndon & Edgerley, 2005; Ludhova et al., 2015] или в нижнем слое мантии [Meijer & van Westrenen, 2008], не затронутом конвективными процессами [Tolstikhin et al., 2006] (таблица). Гипотетическое функционирование геореакторов в земном ядре ранее рассматривалось с точки зрения их предполагаемого влияния на магнитное поле нашей планеты [Herndon, 1993; Rusov et al., 2007] и даже связывалось с образованием Луны якобы в результате природного ядерного взрыва [Meijer et al., 2013], однако практически не обсуждалось в контексте долгосрочных изменений климата Земли.

Таблица. Основные характеристики гипотетических глубинных геореакторов, ранее предлагавшихся в литературе

Table. Main features of hypothetical deep-Earth georeactors previously postulated in the literature

Начало работы, млрд лет назад	Локализация	Тип реактора	Мощность, ТВт	Ссылка
~4.5	Нижний слой мантии	Реактор-размножитель	~5.0	[Meijer & van Westrenen, 2008]
~3.0	Твердое внутреннее ядро		НД	[Herndon, 1993]
~4.5			< 30.0	[Herndon & Edgerley, 2005]
НД			≤ 4.5	[Ludhova et al., 2015]
~4.0	Граница твердого и жидкого ядер		НД*	[Anisichkin et al., 2008]
~4.0–4.5		Реактор на бегущей волне	~30.0	[Rusov et al., 2007]

*Нет данных

Отдавая должное авторам обсуждаемой работы, мы предлагаем критический мультидисциплинарный взгляд на изложенную ими концепцию. В данной дискуссионной статье убедительно доказывается, что предположение о функционировании импульсного ядерного геореактора в ядре Земли зиждется на превратных представлениях о гравитационной дифференциации земного вещества в процессе планетогенеза. Попутно демонстрируется несостоятельность других моделей глубинных геореакторов, равно как и отсутствие условий для самопроизвольного запуска ядерных реакций даже в осадочном слое земной коры на протяжении последних 2 млрд лет.

Кроме того, подвергается сомнению возможность передачи избыточного радиогенного тепла через мантийную толщу за геологически приемлемый промежуток времени. Даже если бы глубинный геореактор мог существовать и функционировать в импульсном режиме, эта теплопередача потребовала бы десятков, если не сотен миллионов лет, что исключало бы синхронизацию куда менее продолжительных циклов его работы (90–130 тысяч лет) с периодами прогрева и охлаждения земной коры. Более того, в статье показывается, что такой прогрев вряд ли повлек бы за собой массивное высвобождение ПГ из их естественных резервуаров, в частности метана из газогидратов, залегающих под морским дном. Наконец, авторы обсуждаемой

работы не учитывают буферную роль донных отложений и водной толщи Мирового океана, способных окислять метан, выделившийся из газогидратов, до его попадания в атмосферу.

Ознакомившись с данной дискуссионной статьей, читатель сможет убедиться, что львиная доля критикуемых теоретических допущений, включая саму возможность формирования геореакторов под земной корой, противоречит данным целого ряда научных дисциплин, начиная с геохимии и заканчивая климатологией.

ВОЗМОЖНОСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Правомочность авторской концепции глубинного импульсного геореактора

Современная наука не отрицает того факта, что радиоактивный распад долгоживущих радиоактивных элементов, прежде всего актиноидов (урана и тория), вносит более или менее значительный вклад (13–37 ТВт) в суммарный поток тепла из недр Земли к ее поверхности (~43–49 ТВт) [Arevalo et al., 2009; Dye, 2012]. Однако возможность существования ядерного реактора в земных недрах вызывает огромные сомнения хотя бы по той причине, что оседание частиц актиноидов или их соединений на внутреннее ядро нашей планеты, постулируемое авторами критикуемой концепции и необходимое для достижения критической массы, совершенно не вписывается в современные представления о формировании Земли.

Согласно этим представлениям, гравитационная дифференциация вещества Первоземли происходила параллельно с аккрецией планетезималей и более крупных планетных зародышей, состоявших преимущественно из металлического железа и силикатных пород [Rubie & Jacobson, 2016; Yoshino et al., 2003]. Череду импактных событий сопровождало образование магматического океана (МО) [Tonks & Melosh, 1993], в котором жидкая металлическая фаза выделялась из расплава силикатов за счет разности плотностей, а также низкой вязкости этого расплава при высоких давлениях [Liebske et al., 2005] (**Рис. 1, а**). Что же касается других химических элементов, присутствовавших в расплаве, то они в различных соотношениях распределялись между металлическим ядром и силикатной мантией по мере оформления этих структур. В результате ядро обогащалось сидерофильными элементами в виде простых веществ, а в мантии оказались сконцентрированы элементы литофильной природы в форме оксидов [Wood et al., 2006].

Уран и торий принадлежат к числу тугоплавких литофильных элементов, тяготеющих к переходу из металлической в силикатную фазу расплава при установлении межфазного химического равновесия [McDonough & Sun, 1995]. Распределение урана между компонентами железосиликатного расплава изучалось в ячейках с алмазными наковальнями [Chidester et al., 2017; Blanchard et al., 2017], устройство которых позволяло воспроизводить экстремальные величины давлений (40–70 ГПа) и температур (3500–5000 К), соответствующие смоделированным условиям равновесия в толще МО [Bouhifd & Jephcoat, 2011]. Поведение тория при тех же условиях не оценивалось, однако близкие значения коэффициентов распределения железо-силикат ($1.71 \cdot 10^{-3}$ – $1.64 \cdot 10^{-2}$ и $1.89 \cdot 10^{-4}$ – $4.00 \cdot 10^{-3}$ для тория и урана соответственно), полученные в аналогичных экспериментах при более низких температурах и давлениях (8 ГПа и 2373 К соответственно), позволяют предположить, что оба этих элемента перешли в жидкое ядро Земли в сопоставимых концентрациях [Faure et al., 2020].

Результаты этих экспериментов согласовывались с гипотезой о преимущественном концентрировании актиноидов в примитивной мантии при гравитационной дифференциации МО. По оценкам авторов указанных работ, на момент оформления жидкого ядра (~4.5 млрд лет назад) в нем оказалось растворено не более 2.5–3.5 ppb металлического урана [Chidester et al., 2017; Blanchard et al., 2017], тогда как в силикатный расплав изначально могло перейти ~54 ppb урана в составе оксидов (прежде всего, UO_2) [Chidester et al., 2017]. В современной силикатной Земле (мантия + земная кора) содержание урана уменьшилось до ~20 ppb в связи с его радиоактивным распадом [McDonough & Sun, 1995; Arevalo et al., 2009]. В свою очередь, содержание оксида тория (ThO_2) в силикатной Земле, в пересчете на элементарный торий, оценивается в ~99 и ~80 ppb на заре ее существования и на текущий момент соответственно (**Рис. 1, б**).

Столь незначительная концентрация урана и тория не только в ядре, но и в примитивной мантии при выраженной литофильности этих элементов определялась их малыми запасами в аккрецирующем протопланетном веществе, предполагаемый состав которого совпадает с составом хондритовых метеоритов [Wasson & Kallemeyn, 1988], доступных непосредственному изучению и

тождественных основным строительным блокам Земли [Boyet et al., 2018]. Очевидно, что оксиды урана и тория, присутствуя в силикатном мантийном расплаве в следовых количествах, не могли выкристаллизоваться из этого расплава при его остывании. Неспособность оксидов урана к образованию самостоятельных минеральных фаз в мантийной толще подтверждают модельные эксперименты в ячейках с алмазными наковальнями [Gautron et al., 2006; Gréaux et al., 2009]. В частности, было показано, что при давлениях до 54 ГПа и температурах до 2400 К Са-перовскит (CaSiO_3) – один из типичных мантийных минералов [Hirose et al., 2017] – может инкорпорировать в свою кристаллическую решетку до 4% урана по массе [Gautron et al., 2006; Gréaux et al., 2009], что согласуется с результатами расчетов по теории функционала плотности (ТФП) [Perry et al., 2017]. Аналогичным образом в структуру Са-перовскита способен включаться и торий в сопоставимых количествах [Perry et al., 2017].

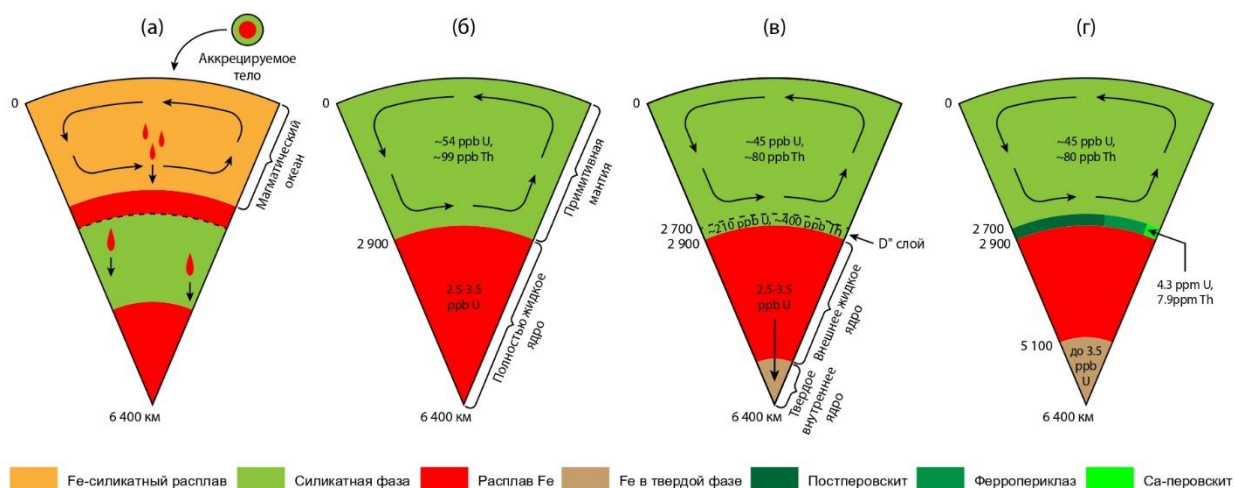


Рис. 1. Схема концентрирования актиноидов (урана и тория) и их оксидов в глубинных геохимических резервуарах по мере дифференциации ядра и мантии Земли:

(а) дифференциация магматического океана (МО) на аккреционной стадии развития Земли (штриховая линия соответствует ликвидусу силикатного вещества); (б) окончание дифференциации МО на примитивную мантию и жидкое металлическое ядро; (в) кристаллизация следовых количеств урана и тория из жидкого ядра в формирующееся твердое ядро наряду с концентрированием их оксидов в пограничном мантийном D''-слое (штриховой линией обозначена его граница с вышележащей мантийной толщей), не затронутом конвективными процессами; (г) избирательное концентрирование оксидов урана и тория в Са-перовскитовой фазе в пределах D''-слоя. Закольцованные стрелки указывают на конвекцию железосиликатного расплава (а) и мантийного вещества (б, в, г). Содержание актиноидов в геохимических резервуарах соответствует их оценочным концентрациям на момент оформления жидкого ядра и примитивной мантии ~4.5 млрд лет назад (принятый возраст Земли). Предполагаемое содержание актиноидов в ядре приведено только для урана ввиду отсутствия надежных данных для тория.

Fig. 1. Scheme of actinide distribution between deep-Earth geochemical reservoirs during core-mantle differentiation:

(a) magma ocean (MO) differentiation during a later stage of the Earth's accretion (silicate liquidus is indicated with dashed line); (b) MO completely differentiated into the primitive mantle and the liquid metallic core; (c) exsolution of uranium and thorium from the liquid core into the solid one as the latter crystallizes, as well as concentration of their oxides in the lowermost mantle (D''-layer) unaffected by convective processes (separated from the overlying mantle rock with dashed line); (d) concentration of uranium and thorium oxides in the Ca-perovskite phase within D''-layer. Looped arrows indicate convective circulation of MO (a) and the mantle (b, c, d). Estimated actinide concentrations in deep-Earth geochemical reservoirs correspond to those at the moment of core-mantle differentiation (~4.5 Ga, accepted age of the Earth). Thorium concentrations in the core are omitted due to the lack of reliable data.

Таким образом, весь мантийный уран, как и торий, должен был быть включен в кристаллическую решетку Са-перовскита или других перовскитоподобных минералов, вместо

того чтобы осесть в виде оксидов на твердое внутреннее ядро Земли, даже если оно начало оформляться в ходе аккреции планетных зародышей и дифференциации МО [Arkani-Hamed, 2016], а не гораздо позже, как предполагается большинством предложенных моделей [Buffett, 2013; Gubbins et al., 1979]. Что же касается следовых количеств урана, перешедших в расплав железа при дифференциации МО, то они, как показывают расчеты по ТФП, могли необратимо перераспределяться во внутреннее ядро Земли по мере его отвердевания, образуя точечные дефекты в кристаллической решетке железа или микровключения чистого металла [Botana et al., 2025]. Тем самым исключается обратимое концентрирование урана на границе жидкого и твердого ядер [Herndon, 1993], необходимое для запуска импульсного геореактора, равно как и накопление критической массы урана в центре твердого ядра [Rusov et al., 2007] (**Рис. 1, в, г**).

Сторонники критикуемой концепции по тем или иным причинам не соотнесли свои выкладки с вышеизложенными геохимическими соображениями. Пытаясь обосновать возможность кристаллизации оксидов урана и тория из железосиликатного расплава с их последующим оседанием на твердое ядро, авторы статьи сослались на [Mitrofanov et al., 1999]. Однако в этой экспериментальной работе изучалось не распределение UO_2 между металлической и силикатной фазами расплава, а его осаждение из чистого расплава железа, что абсолютно нерелевантно условиям дифференциации МО. Кроме того, измеренная растворимость UO_2 в жидком железе ($0.32 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$), которую авторы статьи сочли достаточно низкой, в $\sim 10^4$ - 10^5 раз превышает его предполагаемую концентрацию в толще МО, определяемую составом аккрецирующего протопланетного вещества [Rubie et al., 2015; Clesi et al., 2016]. Таким образом, данные, приведенные в [Mitrofanov et al., 1999], на самом деле служат дополнительным аргументом против той гипотезы, для подтверждения которой их пытались использовать.

Возможность формирования глубинных геореакторов без образования актиноидами самостоятельных минеральных фаз

Чтобы исключить возможность формирования глубинных геореакторов иного типа, ранее обсуждавшуюся в литературе другими авторами [Meijer & van Westrenen, 2008], нужно рассмотреть вопрос о том, могли ли значительные количества актиноидов концентрироваться в кристаллической решетке других минералов, образовавших отдельные фазы при остывании примитивной мантии. Наилучшие условия для глубинного концентрирования актиноидов могли сложиться в нижней мантии на ее границе с ядром. Этот так называемый слой D", объем которого составляет лишь 5% от изначального объема всей примитивной мантии, не был затронут конвекцией мантийного вещества, в силу чего там могло остаться около 20% всех запасов урана и тория, перешедших в силикатный расплав при дифференциации магматического океана [Tolstikhin et al., 2006]. Такое соотношение соответствует 4-кратному концентрированию этих элементов в этом слое относительно примитивной мантии (**Рис. 1, в**).

Далее эксперименты при высоких давлениях и температурах показали, что три ключевых минерала (Са-перовскит, постперовскит (плотнейшая форма Mg-перовскита) и ферропериклаз), слагающие нижнюю мантию, отличаются по своему родству к актиноидам. Са-перовскит, на долю которого приходится лишь 5% объема слоя D" [Hirose et al., 2017], способен включать в кристаллическую решетку в $\sim 10^4$ - 10^5 раз больше урана и тория, чем два других упомянутых минерала [Walter et al., 2004; Corgne et al., 2005]. В результате стоило ожидать последующего 20-кратного концентрирования этих элементов в Са-перовскитовой минеральной фазе при дифференциации нижней мантии.

Результатирующему 80-кратному обогащению Са-перовскита ураном и торием относительно примитивной мантии должны были соответствовать повышенные концентрации этих элементов в слое D" (4.3 и 7.9 ppm соответственно), сопоставимые с их содержанием в современной земной коре [Lambert & Heier, 1968] (**Рис. 1, г**). Однако эти количества в любом случае крайне далеки от критических: модельные расчеты показывают, что концентрация урана в твердой фазе, минимально необходимая для инициирования мантийного геореактора на заре существования Земли, составляет $\sim 1\%$ по массе [Ravnik & Jeraž, 2005]. Если учесть присутствие в Са-перовскитовой фазе малого количества (23 ppb) плутония-244 (^{244}Pu), концентрирующегося в ней вместе с ураном и торием и выступающего как источник быстрых нейтронов, можно ожидать запуска цепной ядерной реакции и при гораздо меньших, но всё же не настолько малых концентрациях этих двух элементов. Расчеты показывают, что для ее инициации уран и торий

должны были быть дополнительно сконцентрированы в Са-перовскитовой фазе ещё примерно в 20 раз. Некоторые исследователи допускают, что современная геохимия учитывает не все существующие факторы концентрирования актиноидов в слое D" [Meijer & van Westrenen, 2008] или даже в пределах вышележащей мантийной толщи, куда, как показывает простой расчет, могло перейти ~45 ppb урана и ~80 ppb тория (Рис. 1, в, г), однако такие рассуждения на сегодняшний день не выходят за пределы чистой спекуляции.

Таким образом, в глубинных слоях Земли актиноиды не могут ни кристаллизоваться в виде самостоятельных минеральных фаз, ни концентрироваться в критических количествах в составе других фаз, чем почти наверняка исключается возможность протекания цепных ядерных реакций под земной корой.

Пространственно-временные условия возможного появления природных ядерных реакторов в истории Земли

Как авторы критикуемой концепции, так и сторонники родственных гипотез ссылаются на так называемый феномен Окло, допуская возможность существования глубинных геореакторов по аналогии с уникальным скоплением реально существовавших природных ядерных реакторов в урановых месторождениях [Petrov, 1977]. Без обсуждения условий, сопутствовавших функционированию последних, такая аналогия затушевывает тот факт, что для самопроизвольного запуска цепной ядерной реакции в природе необходимо исключительное стечение множества обстоятельств.

Теоретически такие реакторы могли время от времени возникать в районах поверхностного скопления радиоактивных руд, где происходит разгрузка гидротермальных флюидов [Hazen et al., 2009], выносящих уран и торий из магматических камер, внутри которых эти элементы концентрировались в поздних дифференциатах (остаточных расплавах) по мере затвердевания интрузивов [Dosseto & Turner, 2010]. Возможность протекания природных цепных реакций с участием минералов урана была предсказана еще в 1950-х гг. [Kuroda, 1956], а в 1970-х следы таких реакций были обнаружены в урановых рудах месторождения Окло в Габоне [Petrov, 1977].

Уникальность феномена Окло лишь подтверждает, что даже в концентрированных урановых рудах запуск цепной реакции возможен лишь при одновременном соблюдении нескольких условий, редко выполняемых даже порознь. Так, в наиболее распространенных месторождениях песчаникового типа она может начаться только при крайне высоком (>10% по массе) содержании урана, притом что очень богатыми считаются руды с массовой долей этого элемента >1%, а критическая толщина урансодержащего активного слоя должна составлять не менее 50 см. Кроме того, этот слой должен быть хорошо проницаем для воды, играющей роль замедлителя нейтронов, что соответствует пористости $\geq 15\%$, которая достигается только при нарушениях сплошности вмещающей породы, связанных с тектонической активностью [Naudet, 1991].

Наконец, сама возможность возникновения природного ядерного реактора в осадочном слое земной коры была приурочена к достаточно узкому временному окну, в которое как раз укладывается феномен Окло (~2.0 млрд лет назад): в более ранние геологические эпохи недостаток атмосферного кислорода не позволял формироваться рудным телам с высоким содержанием урана, а вскоре после того как состав атмосферы изменился и такие руды начали накапливаться в земной коре, изотопное соотношение природного урана ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$) упало ниже критической отметки, необходимой для запуска цепной реакции [Gauthier-Lafaye & Weber, 2003].

Таким образом, если в ранней геологической истории Земли где-либо и функционировали другие природные ядерные реакторы, кроме тех, которые удалось обнаружить в Окло, то на сегодняшний день эта возможность, и без того крайне маловероятная, практически исключена. Что же касается предположения о существовании глубинных геореакторов под земной корой, ранее уже отвергнутого по геохимическим соображениям, то его стоит признать беспочвенным еще и потому, что за 4.5 млрд лет, прошедших с момента дифференциации МО, изначальный пул актиноидов в земном веществе заметно истощился [Arevalo et al., 2009].

ВОЗМОЖНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ РАДИОГЕННОГО ТЕПЛА ОТ РАБОТЫ ГЕОРЕАКТОРА К ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Хотя ошибочность теоретических построений, на который базируется предположение о существовании глубинных геореакторов, была только что доказана, в рамках мысленного эксперимента можно вообразить, что в земных недрах прошла ядерная реакция, тепло от которой должно передаться через мантию к поверхности Земли и тем самым повысить температуру коры.

Известно, что твердое вещество мантии, находясь под высоким давлением и будучи разогретым до высоких температур, ведет себя как жидкость, подверженная вязкой деформации. Разница температур на границах мантия – ядро и мантия – кора приводит к установлению конвекции Рэлея – Бенара, захватывающей подавляющую часть мантийной толщи, за исключением пограничных слоев [Bercovici, 2010], в том числе ранее упомянутого слоя D".

Закон Фурье для кондуктивного теплопереноса, которым ошибочно пользуются авторы обсуждаемой статьи для оценки времени, за которое избыточное радиогенное тепло могло бы передаться из ядра в кору, применим только к пограничным слоям, но не ко всей мантийной толще. Если же исходить из скоростей восходящих конвективных течений в мантии, примерно соответствующих скоростям движения литосферных плит ($1-10 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$) [Bercovici, 2010], то это время окажется сопоставимо со временем жизни Земли и на несколько порядков превысит период температурных флуктуаций, приписываемых работе геореактора (90-130 тыс. лет). Независимый от конвекции подъем термохимических плюмов осуществляется гораздо быстрее ($>100 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$) [Kirdyashkin et al., 2016; Bercovici, 2010] и сокращает время теплопередачи через мантию до миллионов лет, однако за столь длительный срок эти флуктуации в любом случае рассеялись бы в окружающем мантийном веществе, что исключает синхронизацию циклов работы геореактора с периодами прогрева и охлаждения земной коры.

ВОЗМОЖНОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ (ПГ) ИЗ ИХ ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ПРИ ГИПОТЕТИЧЕСКОМ ПРОГРЕВАНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ (НА ПРИМЕРЕ ДИССОЦИИАЦИИ ГАЗОГИДРАТОВ)

Как уже отмечалось, авторы критикуемой статьи полагают, что постулируемый ими приток избыточного радиогенного тепла из недр Земли к ее поверхности может стимулировать усиленное поступление ПГ в атмосферу, которое, как утверждается, становится триггером потепления при переходе от очередного оледенения к новому межледниковью. К основным резервуарам ПГ, чувствительным к прогреванию земной коры, причисляется океаническая толща, запасы диоксида углерода в которой в десятки раз превышают его содержание в атмосфере [Falkowski et al., 2000], а также залежи газогидратов метана под морским дном и в зонах распространения многолетнемерзлых пород.

Опровержение такого предположения требует рассмотрения воображаемой ситуации, при которой геореактор мог бы функционировать в глубинных слоях Земли, а генерируемое им тепло вносило бы существенный вклад в прогревание земной коры. До каких температур она должна была бы прогреться, чтобы ПГ начали активно высвобождаться из своих естественных резервуаров в атмосферу? Проще всего ответить на этот вопрос применительно к высвобождению метана из газогидратов, чему и будут посвящены дальнейшие рассуждения.

Хотя суммарные запасы газогидратного метана, по наиболее современным оценкам, эквивалентны сотням или даже тысячам Пг ($\text{Пг} = 10^{15} \text{ г}$) чистого углерода [Hunter et al., 2013; Milkov, 2004; Piñero et al., 2013; Wallmann et al., 2012], что сопоставимо с валовым содержанием углерода в современной атмосфере (885 Пг С в виде диоксида углерода) [Friedlingstein et al., 2022], львиная доля газогидратов (~95%) залегает под морским дном в нижних частях континентальных склонов на глубинах $>1000 \text{ м}$ [Ruppel & Kessler, 2017] и лишь ~1% ассоциировано с мерзлотой (Рис. 2). Дестабилизация глубинных газогидратных залежей требует резкого изменения термобарических условий в придонном слое, возможного лишь при экстремальных нарушениях климатического баланса Земли. Так, например, при глубине водной толщи около 1200 м зона стабильности газогидратов в морских донных отложениях составляет 250-300 м; для полной дестабилизации газогидратов в пределах всей этой зоны температура дна должна была бы повыситься с современных 1-2 до ~14 °C [Ruppel & Kessler, 2017] (Рис. 2).

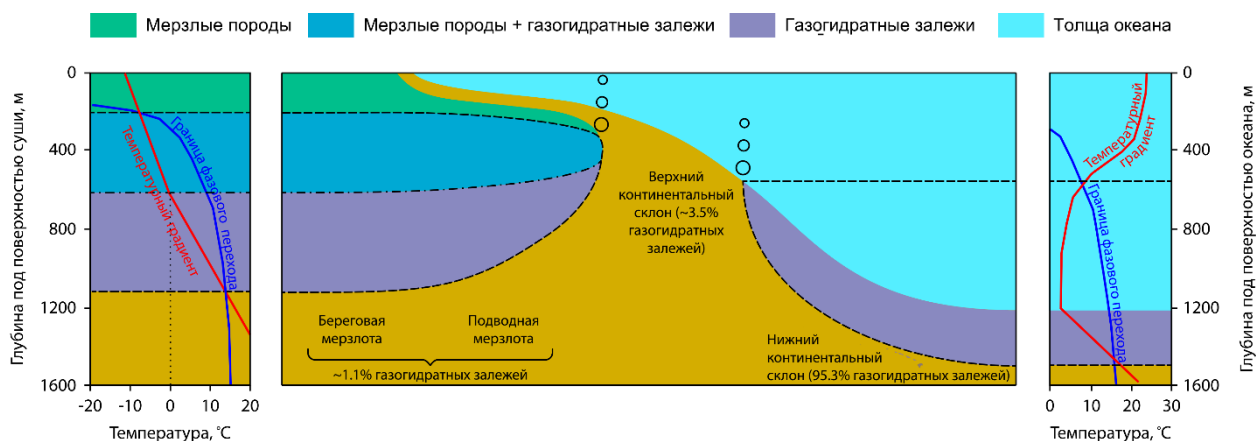


Рис. 2. Термобарические условия существования газогидратов метана в зонах распространения многолетнемерзлых пород (слева) и в океанических донных отложениях (справа). Зоны потенциального залегания газогидратов обведены штриховыми линиями; штрихпунктирной линией обозначена нижняя граница мерзлых пород. Схема адаптирована из [Ruppel & Kessler, 2017]; процентный вклад различных геологических резервуаров в общие запасы газогидратов приведен с опорой на тот же литературный источник. Подледниковые газогидратные залежи, погребенные под Антарктическим ледяным щитом, опущены для наглядности.

Fig. 2. Temperature-depth conditions for methane hydrate stability in permafrost areas (on the left) and in the marine sediments (on the right). Zones of potential methane hydrate occurrence are depicted by dotted lines; dash-dotted line refers to the lower boundary of the permafrost layer. The scheme is based on [Ruppel & Kessler, 2017], as well as the contribution of different geological reservoirs to a total methane hydrate inventory. Subglacial methane hydrates buried below Antarctic ice sheet were omitted from this scheme for reasons of clarity.

Справедливости ради, подобное, хотя и не столь резкое изменение температурного режима Мирового океана, случалось в геологической истории Земли как минимум однажды. Речь идет о так называемом палеоцен-эоценовом термическом максимуме (ПЭТМ) около 57.33 млн лет назад [Kennett & Stott, 1991], которому соответствовало повышение температуры глубинных океанических вод с ~ 10 до $\sim 14-15$ °C, на что указывают ее оценки, полученные исходя из соотношения стабильных изотопов кислорода ($^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$) [Corfield & Cartlidge, 1992], а также магния и кальция (Mg/Ca) [Lear et al., 2000] в составе ископаемых раковин фораминифер.

Изотопный анализ и модельные расчеты показывают, что столь значительное прогревание океанической толщи могло привести к высвобождению ~ 2700 Пг CH_4 [Dickens, 1995; Dickens et al., 1997] из газогидратов, залегающих на участках дна глубиной до 1900-2400 м [Bice & Marotzke, 2002]. Однако лишь весьма незначительная доля от этого количества метана могла бы в конце концов достичь атмосферы, избежав накопления в стратиграфических ловушках [Davies & Clarke, 2010], анаэробного окисления в сульфат-метановой переходной зоне донных отложений и аэробного окисления в водной толще [Reeburgh, 2007].

На сегодняшний день в донных отложениях и водной толще суммарно утилизируется $>95\%$ метана, образующегося при фоновой диссоциации газогидратов ($400 \text{ Тг } \text{CH}_4 \text{ год}^{-1}$) [Reeburgh, 2007; Ruppel & Kessler, 2017]. Можно допустить, что при их диссоциации в гораздо большем масштабе перечисленные утилизирующие механизмы могли не справляться с огромными количествами высвободившегося метана, однако более вероятен компенсаторный сценарий, при котором перераспределились бы вклады этих механизмов в утилизацию метана, но общая эффективность утилизации осталась бы сопоставимой. Так, через сульфатно-метановую переходную зону донных отложений, в которой окисляется 80-90% метана при фоновой диссоциации газогидратов [Reeburgh, 2007], могло просочиться больше газа в неокисленном виде. Однако простой расчет показывает, что даже при просачивании всего высвободившегося газогидратного метана (до 2700 Пг CH_4) через донные отложения объема океанической водной толщи ($\sim 1.34 \times 10^6 \text{ км}^3$) хватило бы для его полного растворения с последующим аэробным окислением. Правда, в результате окисления водная толща насытилась бы диоксидом углерода, какая-то часть которого высвободилась бы в атмосферу и, вероятно, повлияла бы на климат, однако это влияние было бы несопоставимо с последствиями высвобождения аналогичных количеств газогидратного метана

хотя бы по той причине, что метан в десятки раз более эффективно удерживает тепло в атмосфере по сравнению с диоксидом углерода [Myhre et al., 2013].

Среди климатологов до сих пор нет консенсуса, сопровождался ли ПЭТМ высвобождением метана из газогидратов. Если их диссоциация всё-таки имела место, то ее причиной, вероятно, являлся выброс углерода из некоего надводного источника (например, при извержениях вулканов) [Gutjahr et al., 2017; Kender et al., 2021] с последующим распространением возникшего отклика вглубь океанической толщи через изменение термохалинной циркуляции, но никак не прогревание земной коры снизу, причем сразу на несколько градусов, чего не смогло бы обеспечить даже функционирование глубинного геореактора, если бы он мог существовать.

Таким образом, глубоководная локализация газогидратных залежей придает им исключительную устойчивость к разложению. Их масштабная диссоциация если когда-нибудь и происходила, то лишь при исключительно редких катастрофических изменениях климата, таких как ПЭТМ, причем триггером таких изменений не могло быть усиление геотермальной активности. Даже если бы геореактор существовал, тепло от его работы не смогло бы в должной мере прогреть земную кору из-за слишком медленной теплопередачи через мантию, а других причин для такого усиления нельзя постулировать даже теоретически, поскольку поток тепла из земных недр с течением времени, наоборот, лишь ослабевает по мере их остывания и истощения первоначального пула радиогенных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предположение о существовании импульсного геореактора в земном ядре, как и ряд смежных гипотез, покоится на превратных представлениях о дифференциации, строении и функционировании оболочек Земли. Мы показали, что такие представления противоречат данным сразу нескольких научных дисциплин, начиная от геохимии и заканчивая климатологией.

Во-первых, природные ядерные реакторы могли функционировать только в далеком геологическом прошлом Земли (>2.0 млрд лет назад) и не в глубинных слоях нашей планеты, где отсутствуют условия для критического концентрирования актиноидов, а исключительно в осадочном слое земной коры.

Во-вторых, низкая скорость передачи избыточного радиогенного тепла через мантию Земли не позволила бы синхронизировать циклы работы импульсного геореактора с периодами прогревания и охлаждения земной коры.

В-третьих, избыточное радиогенное тепло, будь оно передано в земную кору без потерь, не смогло бы прогреть ее настолько, чтобы вызвать массивное высвобождение ПГ из естественных резервуаров, в частности метана из глубоководных газогидратов.

В-четвертых, высвободившийся из газогидратов метан окислился бы в донных отложениях и океанической водной толще раньше, чем достиг бы атмосферы, и потому не смог бы внести существенного вклада в потепление климата при переходе от очередного оледенения к новому межледниковью.

ЛИТЕРАТУРА

- Anisichkin V.F. 2025. On the causes of cyclical climate changes. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 16(3): 113-120. DOI: 10.18822/edgcc678513
- Anisichkin V.F., Bezborodov A.A., Suslov I.R. 2008. Georeactor in the Earth. *Transport Theory and Statistical Physics*, 37: 624-633 (in Russian).
- Arevalo R., McDonough W.F., Luong M. 2009. The K/U ratio of the silicate Earth: Insights into mantle composition, structure and thermal evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 278: 361-369.
- Arkani-Hamed J. 2016. Formation of a Solid Inner Core During the Accretion of the Earth. *JGR Solid Earth*, 122: 3248-3285.
- Bercovici D. Mantle convection. 2010. *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, (H. Gupta. ed.), p. 1059-1079, Springer Cham.
- Bice K.L., Marotzke J. 2002. Could changing ocean circulation have destabilized methane hydrate at the Paleocene/Eocene boundary? *Paleoceanography*, 17(2): 8.1-8.12.
- Björnberg K.E., Karlsson M., Gilek M., Hansson, S.O. 2017. Climate and environmental science denial: A review of the scientific literature published in 1990–2015. *Journal of Cleaner Production*, 167: 229-241.
- Blanchard I., Siebert J., Borensztajn S., Badro J. 2017. The solubility of heat-producing elements in Earth's core. *Geochemical Perspectives Letters*, 5(5): 1-5.

- Botana J., Urbach B.S., Moffett-Smith C.M., Gilbert Q.K., McGarvey E.W. 2025. Uranium at the conditions of the Earth's inner core: Fe-U forms and implications. *Physica B: Condensed Matter*, 707: 417181.
- Bouhifd M.A., Jephcoat A.P. 2011. Convergence of Ni and Co metal-silicate partition coefficients in the deep magma-ocean and coupled silicon-oxygen solubility in iron melts at high pressures. *Earth and Planetary Science Letters*, 307: 341-348.
- Boyet M., Bouvier A., Frossard P., Hammouda T., Garçon M., Gannoun A. 2018. Enstatite chondrites EL3 as building blocks for the Earth: The debate over the ^{146}Sm - ^{142}Nd systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 488: 68-78.
- Buffett B. 2013. Earth's enigmatic inner core. *Physics Today*, 66(11): 37-41.
- Chidester B.A., Rahman Z., Richter K., Campbell A.J. 2017. Metal-silicate partitioning of U: Implications for the heat budget of the core and evidence for reduced U in the mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 199: 1-12.
- Clesi V., Bouhifd M.A., Bolfan-Casanova N., Manthilake G., Fabbriozio A., Andraut D. 2016. Effect of H₂O on metal-silicate partitioning of Ni, Co, V, Cr, Mn and Fe: Implications for the oxidation state of the Earth and Mars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 192: 97-121.
- Corfield R.M., Cartledge J.E. 1992. Oceanographic and climatic implications of the Palaeocene carbon isotope maximum. *Terra Nova*, 4(4): 443-455.
- Corgne A., Liebske C., Wood B.J., Rubie D.C., Frost D.J. 2005. Silicate perovskite-melt partitioning of trace elements and geochemical signature of a deep perovskitic reservoir. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69: 485-496.
- Davies R.J., Clarke A.L. 2010. Methane recycling between hydrate and critically pressured stratigraphic traps, offshore Mauritania. *Geology*, 38(11): 963-966.
- Dickens G. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene // *Paleoceanography*. 1995. V. 10. № 6, P. 965-971.
- Dickens G.R., Castillo M.M., Walker J.C. G. 1997. A blast of gas in the latest Paleocene: Simulating first-order effects of massive dissociation of oceanic methane hydrate. *Geology*, 25(3): 259-262.
- Dosseto A., Turner S. P. 2010. Magma cooling and differentiation - uranium-series isotopes. *Timescales of magmatic processes*. (A. Dosseto, S. P. Turner, J. A. Van Orman, eds.), p. 160-180, Chichester, West Sussex, UK; Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, Wiley.
- Dye S.T. 2012. Geoneutrinos and the radioactive power of the Earth. *Reviews of Geophysics*, 50(3): RG3007.
- Falkowski P., Scholes R.J., Boyle E., Canadell J., Canfield D., Elser J., Gruber N., Hibbard K., Höglberg P., Linder S., Mackenzie F.T., Moore B., Pedersen T., Rosenthal Y., Seitzinger S., Smetacek V., Steffen W. 2000. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system. *Science*, 290(5490): 291-296.
- Faure F., Bouhifd M.A., Boyet M., Manthilake G., Clesi V., Devidal J.-L. 2020. Uranium and thorium partitioning in the bulk silicate Earth and the oxygen content of Earth's core. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 275: 83-98.
- Friedland P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Gregor L., Hauck J., Le Quéré C., Luijckx I.T., Olsen A., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Schwingshackl C., Sitch S., Canadell, J.G., Ciais P., Jackson R.B., Alin S.R., Alkama R., Arneth A., Arora V.K., Bates N.R., Becker M., Bellouin N., Bittig H.C., Bopp L., Chevallier F., Chini L.P., Cronin M., Evans W., Falk S., Feely R.A., Gasser T., Gehlen M., Gkritzalis T., Gloege L., Grassi G., Gruber N., Gürses Ö., Harris I., Hefner M., Houghton R.A., Hurtt G.C., Iida Y., Ilyina T., Jain A.K., Jersild A., Kadono K., Kato E., Kennedy D., Klein Goldewijk K., Knauer J., Korsbakken, J.I., Landschützer P., Lefèvre N., Lindsay K., Liu J., Liu Z., Marland G., Mayot N., McGrath M.J., Metzl N., Monacchi N.M., Munro D.R., Nakaoka S.-I., Niwa Y., O'Brien K., Ono T., Palmer P.I., Pan N., Pierrot D., Pocock K., Poulter B., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Rodríguez C., Rosan T.M., Schwinger J., Séférian R., Shutler J.D., Skjelvan I., Steinhoff T., Sun Q., Sutton A.J., Sweeney C., Takao S., Tanhua T., Tans P.P., Tian X., Tian H., Tilbrook B., Tsujino H., Tubiello F., van der Werf G.R., Walker A.P., Wanninkhof R., Whitehead C., Willstrand Wranne A., Wright R., Yuan W., Yue C., Yue X., Zaehle S., Zeng, J., Zheng B. 2022. Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11): 4811-4900.
- Gauthier-Lafaye F., Weber F. 2003. Natural nuclear fission reactors: time constraints for occurrence, and their relation to uranium and manganese deposits and to the evolution of the atmosphere. *Precambrian Research*, 120(1-2): 81-100.
- Gautron L., Greaux S., Andraut D., Bolfan-Casanova N., Guignot N., Bouhifd M.A. 2006. Uranium in the Earth's lower mantle. *Geophysical Research Letters*, 33(23): 2006GL027508.
- Gréaux S., Gautron L., Andraut D., Bolfan-Casanova N., Guignot N., Bouhifd M.A. 2009. Experimental high pressure and high temperature study of the incorporation of uranium in Al-rich CaSiO₃ perovskite. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 174(1-4): 254-263.
- Gubbins D., Masters T. G., Jacobs J. A. 1979. Thermal evolution of the Earth's core. *Geophysical Journal International*, 59(1): 57-99.
- Gutjahr M., Ridgwell A., Sexton P.F., Anagnostou E., Pearson P.N., Pälke H., Norris R.D., Thomas E.; Foster G.L. 2017. Very large release of mostly volcanic carbon during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature*, 548(7669): 573-577.
- Hazen R. M., Ewing R. C., Sverjensky D. A. 2009. Evolution of uranium and thorium minerals. *American Mineralogist*, 94(10): 1293-1311.
- Herndon J. M. 1993. Feasibility of a Nuclear Fission Reactor at the Center of the Earth as the Energy Source for the Geomagnetic Field. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 45(5): 423-437.
- Herndon J., Edgerley D. 2005. Background for Terrestrial Antineutrino Investigations: Radionuclide Distribution, Georeactor Fission Events, and Boundary Conditions on Fission Power Production. *arXiv: High Energy Physics – Phenomenology*, 1-14.
- Hirose K., Sinmyo R., Hernlund J. 2017. Perovskite in Earth's deep interior. *Science*, 358(6364): 734-738.
- Hunter S.J., Goldobin D.S., Haywood A.M., Ridgwell A., Rees J.G. 2013. Sensitivity of the global submarine hydrate inventory to scenarios of future climate change. *Earth and Planetary Science Letters*, 367: 105-115.
- Kender S., Bogus K., Pedersen G.K., Dybkjær K., Mather T.A., Mariani E., Ridgwell A., Riding J.B., Wagner T., Hesselbo S.P., Leng, M.J. 2021. Paleocene/Eocene carbon feedbacks triggered by volcanic activity. *Nature Communications*, 12(1): 5186.
- Kennett J.P., Stott L.D. 1991. Abrupt deep-sea warming, palaeoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Palaeocene. *Nature*, 353(6341): 225-229.

- Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G., Distanov V.E., Gladkov I.N. 2016. Geodynamic regimes of thermochemical mantle plumes. *Geology and Geophysics*, 57(6): 1092-1105 (in Russian). [Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г., Дистанов В.Э., Гладков И.Н. 2016. Геодинамические режимы мантийных термохимических плюмов // Геология и геофизика. Т. 57. № 6. С. 1092-1105.] DOI: 10.15372/GiG20160602
- Konishchev V. N. 2011. Permafrost response to climate warming. *Earth's Cryosphere*, 4: 15-18 (in Russian). [Конищев В.Н. 2011. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Криосфера Земли. № 4. С. 15-18.]
- Kuroda P.K. 1956. On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals. *The Journal of Chemical Physics*, 25(4): 781-782.
- Lambert I.B., Heier K.S. 1968. Estimates of the crustal abundances of thorium, uranium and potassium. *Chemical Geology*, 3(4): 233-238.
- Lear C.H., Elderfield H., Wilson P.A. 2000. Cenozoic deep-Sea temperatures and global ice volumes from Mg/Ca in benthic foraminiferal calcite. *Science*, 287(5451): 269-272.
- Liebske C., Schmickler B., Terasaki H., Poe B.T., Suzuki A., Funakoshi K., Ando R., Rubie D.C. 2005. Viscosity of peridotite liquid up to 13 GPa: Implications for magma ocean viscosities [rapid communication]. *Earth and Planetary Science Letters*, 240: 589-604.
- Ludhova L., Bellini G., Benziger J., Bick D., Bonfini G., Bravo D., Caccianiga B., Calaprice F., Caminata A., Cavalcante P., Chavarria A., Chepurnov A., D'Angelo D., Davini S., Derbin A., Empl A., Etenko A., Fomenko K., Franco D., Fiorentini G., Galbiati C., Gazzana S., Ghiano C., Giammarchi M., Göger-Neff M., Goretti A., Hagner C., Hungerford E., Ianni A., Ianni A., Kobychew V., Korablev D., Korga G., Kryn D., Laubenstein M., Lehnert B., Lewke T., Litvinovich E., Lombardi F., Lombardi P., Lukyanchenko G., Machulin I., Manecki S., Maneschg W., Mantovani F., Marcocci S., Meindl Q., Meroni E., Meyer M., Miramonti L., Misiaszek M., Mosteiro P., Muratova V., Oberauer L., Obolensky M., Ortica F., Otis K., Pallavicini M., Papp L., Perasso L., Pocar A., Ranucci G., Razeto A., Re A., Ricci B., Romani A., Rossi N., 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., Wang H., Winter J., Wojcik M., Wright A., Wurm M., Zaimidoroga O., Zavatarelli S., Zuber K., Zuzel G. 2015. Geo-neutrinos and Borexino. *Phys. Part. Nuclei*, 46(2): 174-181.
- McDonough W. F., Sun S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223-253.
- Meijer de R. J., Anisichkin V. F., van Westrenen W. 2013. Forming the Moon from terrestrial silicate-rich material. *Chemical Geology*, 345: 40-49.
- Meijer de R. J., van Westrenen W. 2008. The feasibility and implications of nuclear georeactors in Earth's core-mantle boundary region. *South African Journal of Science*, 104: 111-118.
- Milankovitch M. 1941. Kanon der Erdbestrahlungen und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. *Royal Serbian Academy. 371 Section of Mathematical and Natural Sciences*. Vol. 33. Belgrade.
- Milkov A.V. 2004. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? *Earth-Science Reviews*, 66(3-4): 183-197.
- 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 bowels of planets. In: *Proceedings of the International Conference "V Zababakhin Scientific Readings."* Snezhinsk: RFNC-VNIITF Publishing House, 67-76 (in Russian). [Митрофанов В.В., Анисичкин В.Ф., Воронин Д.В., Жилин А.А., Федоров А.В., Крюков Б.П., Туркин А.И. 1999. О возможности взрывного ядерного энерговыделения в недрах планет // Труды Международной конференции V Забабахинские научные чтения. Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ. С. 67-76.]
- Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, p. 659-740, Cambridge: Cambridge University Press.
- Naudet R. 1991. *Oklo: des réacteurs nucléaires fossiles*. Paris: Collection du Commissariat à l'Énergie Atomique, 695 p.
- Perry S.N., Pigott J. S., Panero W. R. 2017. Ab initio calculations of uranium and thorium storage in CaSiO₃-perovskite in the Earth's lower mantle. *American Mineralogist*, 102: 321-326.
- Petrov Y.V. 1977. The Oklo natural nuclear reactor. *Soviet Physics Uspekhi*, 20(11): 937.
- Piñero E., Marquardt M., Hensen C., Haeckel M., Wallmann K. 2013. Estimation of the global inventory of methane hydrates in marine sediments using transfer functions. *Biogeosciences*, 10(2): 959-975.
- Ravnik M., Jeraj R. 2005. Criticality analyses of regions containing uranium in the earth history. *Kerntechnik*, 70(3): 146-152.
- Reeburgh W.S. 2007. Oceanic Methane Biogeochemistry. *Chem. Rev.*, 107(2): 486-513.
- Rubie D. C., Jacobson S. A. 2016. Mechanisms and Geochemical Models of Core Formation. *Deep Earth: Physics and Chemistry of the Lower Mantle and Core*. (Terasaki H., Fischer R.A. eds.), p. 181-190, American Geophysical Union.
- Rubie D.C., Jacobson S.A., Morbidelli A., O'Brien D.P., Young E.D., de Vries J., Nimmo F., Palme H., Frost D.J. 2015. Accretion and differentiation of the terrestrial planets with implications for the compositions of early-formed Solar System bodies and accretion of water. *Icarus*, 248: 89-108.
- Ruppel C. D., Kessler J. D. 2017. The interaction of climate change and methane hydrates. *Reviews of Geophysics*, 55(1): 126-168.
- 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. Geantineutrino spectrum and slow nuclear burning on the boundary of the liquid and solid phases of the Earth's core. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 112: B09203.
- Shpolyanskaya N.A., Osadchaya G.G., Malkova G.V. 2002. Modern climate change and permafrost reaction (on the example of Western Siberia and the European North of Russia). *Geographical Environment and Living Systems*, 1: 6-30 (in Russian). [Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В. 2002. Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского Севера России) // Географическая среда и живые системы. № 1. С. 6-30.] DOI: 10.18384/2712-7621-2022-1-6-30

- Tolstikhin I.N., Kramers J.D., Hofmann A.W. 2006. A chemical Earth model with whole mantle convection: The importance of a core–mantle boundary layer (D'') and its early formation. *Chemical Geology*, 226(3-4): 79-99.
- Tonks W.B., Melosh H.J. Magma ocean formation due to giant impacts // *Journal of Geophysical Research*. 1993. V. 98. P. 5319-5333.
- Wallmann K., Pinero E., Burwicz E., Haeckel M., Hensen C., Dale A., Ruepke L. 2012. The Global Inventory of Methane Hydrate in Marine Sediments: A Theoretical Approach. *Energies*, 5(7): 2449-2498.
- Walter M.J., Nakamura E., Trønnes R.G., Frost D.J. 2004. Experimental constraints on crystallization differentiation in a deep magma ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 4267-4284.
- Wasson J.T., Kallemeyn G.W. 1988. Compositions of Chondrites. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 325: 535-544.
- Wood B.J., Walter M.J., Wade J. 2006. Accretion of the Earth and segregation of its core. *Nature*, 441(7095): 825-833.
- Yoshino T., Walter M.J., Katsura T. 2003. Core formation in planetesimals triggered by permeable flow. *Nature*, 422(6928): 154-157.

Поступила в редакцию: 15.10.2025

Переработанный вариант: 07.11.2025

Принято в печать: 16.11.2025

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.