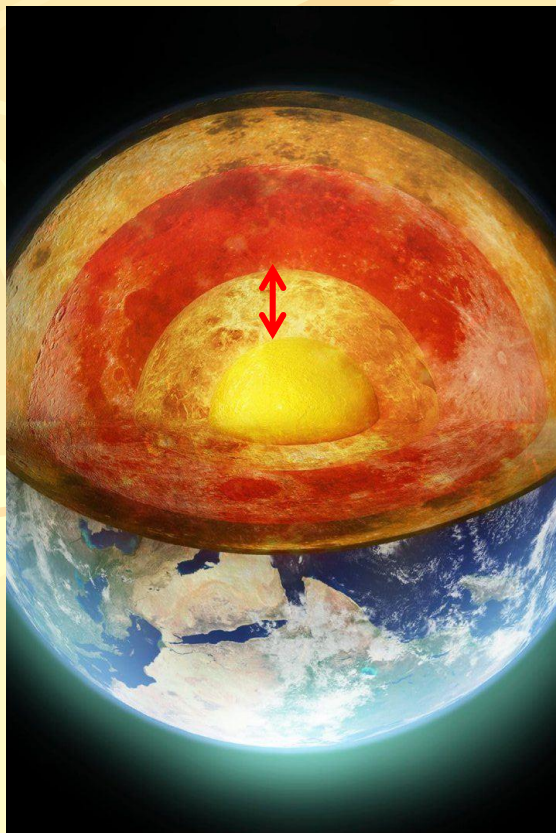


О цепных ядерных реакциях во внешнем жидком ядре Земли

Анисичкин В. Ф.

E-mail: avf@hydro.nsc.ru

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск



Природные цепные ядерные реакции (геореакторы)

Возможность концентрации актиноидов в недрах Земли и **цепные ядерные реакции в природе** обсуждаются достаточно давно. (Наиболее распространенная гипотеза с середины 50-х - радиоактивный слой в нижней мантии Земли.)

Orr (1949),

Kuroda, 1956;

Driscoll, 1988;

Herndon, 1993;

Анисичкин, 1997;

Митрофанов, Анисичкин, и др., 1999;

Ершов, Анисичкин, 2003;

Anisichkin et al., 2008;

Скорохватов, 2012;

Safronov, 2020.

Такую возможность прямо подтверждают следы **циклической работы природных ядерных реакторов в земной коре** около 2 млрд. лет назад, найденные в месторождениях Окло (Западная Африка).

Но есть ли уран и торий в ядре Земли в количествах, достаточных для протекания цепных ядерных реакций?

Традиционное отнесение урана и тория к **литофильным** элементам не допускало их существенной концентрации **глубоко** в недрах Земли и, следовательно, протекания там цепных ядерных реакций.

Но стали появляться обнадеживающие данные. Так в (*Carlson, Boyet, 2009*) приводятся обоснования того, что **актиноиды** при высоких давлениях **могут менять литофильные свойства на сидерофильные (то есть обладать сродством к железу)**, и поэтому в значительных количествах могут находиться не только, в литосфере (земная кора и часть верхней мантии), но и в железо-никелевом ядре планеты.

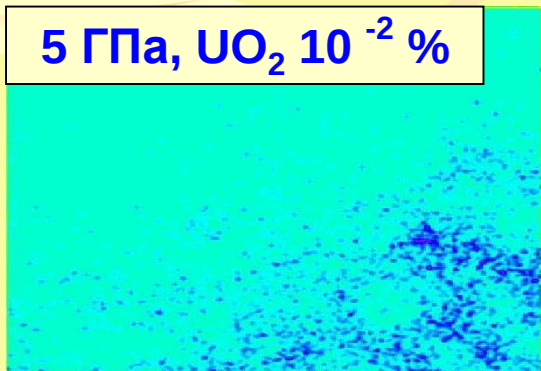
Данные по регистрации геонейтрин, испускаемых реагирующими актиноидами, также говорят о том, что **около половины актиноидов может находиться глубоко в недрах Земли** (*Bellini et al., 2010; Agostini et al., 2015*).

Возможны ли цепные ядерные реакции в ядре Земли?

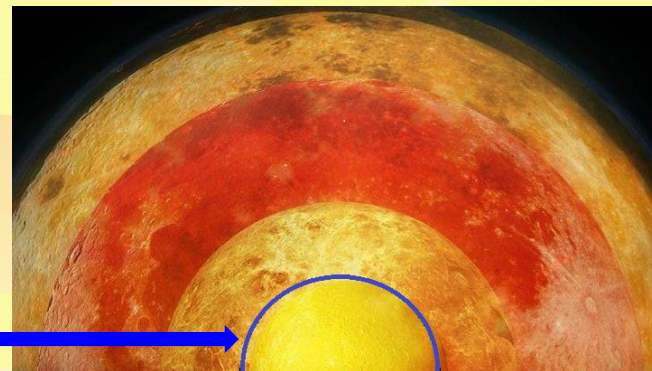
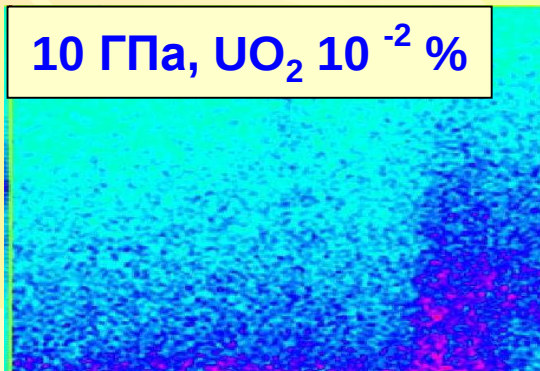
В природе уран и торий существуют в виде высокоплотных и тугоплавких оксидов. Прямые экспериментальные данные говорят о том, что UO_2 практически не растворяется в расплаве железа и оседает на дно ячейки высокого давления (*Митрофанов, Анисичкин и др., ЗНЧ, 1999*).

Поэтому, UO_2 мог оседать из жидкого на твердое внутренне ядро Земли.

5 ГПа, UO_2 10^{-2} %



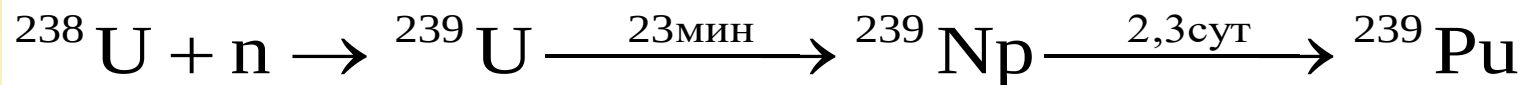
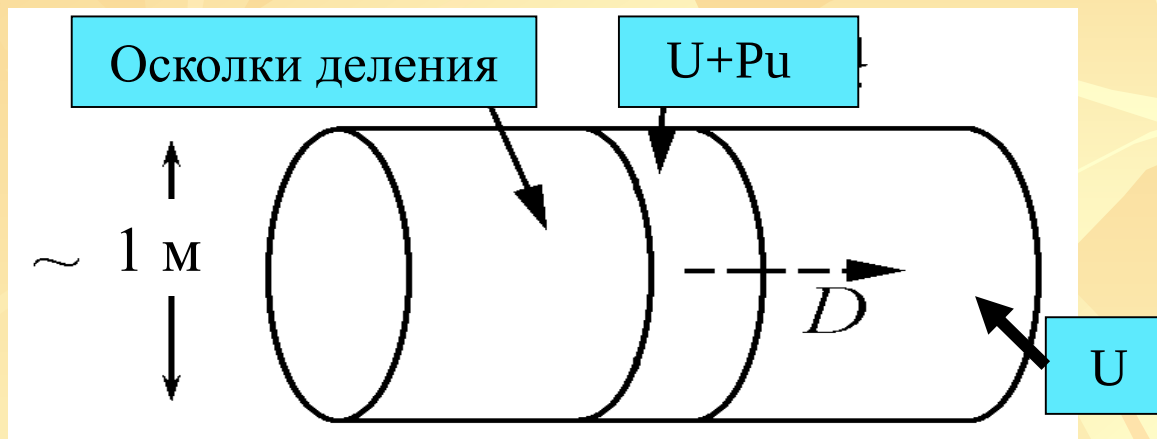
10 ГПа, UO_2 10^{-2} %



Сотни миллионов, миллиарды лет назад концентрации легкоделящегося изотопа ^{235}U было достаточно для начала цепных реакций.

При Солнечной распространенности элементов, в составе Земли урана достаточно для образования на внутреннем ядре слоя толщиной порядка нескольких метров. Критический размер $^{235}\text{UO}_2$ существенно меньше, ~ 20 см (*Бекман, 2010*), поэтому в составе внешнего ядра Земли актиноидов могло быть достаточно для образования околоскритического слоя.

Цепная ядерная реакция в слое актиноидов может протекать, например, по типу нейтронно-делительной волны Феокистова.

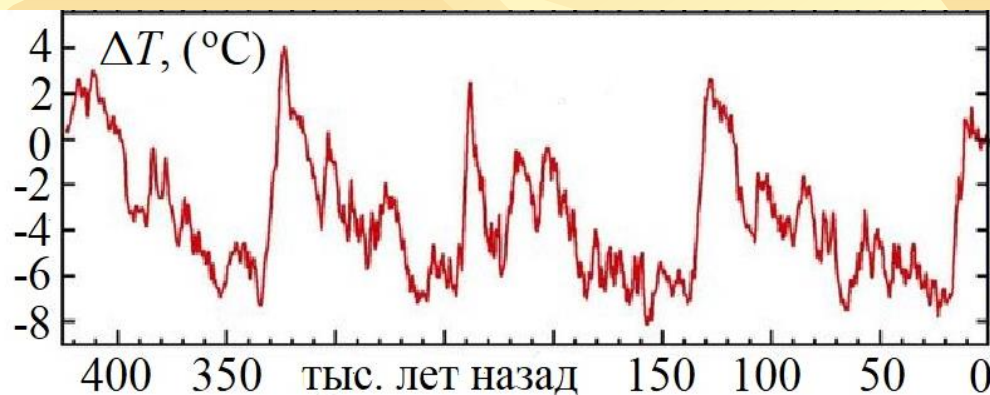


- **Феокистов Л.П.** Нейтронно-делительная волна // Доклады АН СССР. 1989. Т. 309, №4. С. 864–867.
- **Ершов А.П., Анисичкин В.Ф.** О нейтронно-делительной волне // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, №2. С. 121-127.

Нужна ли теория цепных ядерных реакций в ядре Земли? Объясняет ли она факты, лучше других известные теорий?

Есть две задачи **не вполне адекватно** решаемые существующими теориями:

- ❖ Циклические изменения климата за последние миллионы лет.
- ❖ Происхождение спутника Земли – Луны.

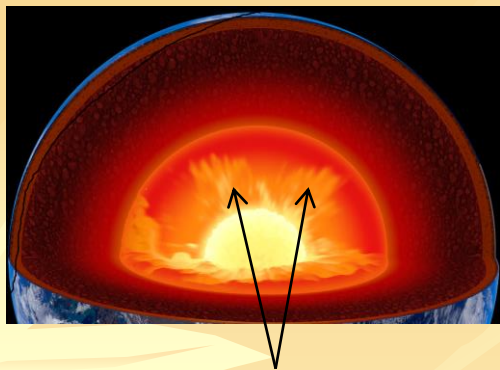


Наиболее популярная теория — **циклы Миланковича** — изменение количества тепла, поступающего от Солнца из-за изменения орбиты и оси вращения Земли.

Но **расчетная длительность циклов Миланковича постоянна**, что не объясняет монотонное увеличение продолжительности климатических циклов от **~ 90 до ~ 120 тыс. лет**.

Наиболее популярная теория «мегаимпакта» испытывает трудности в объяснении **идентичности изотопных составов** Земли и Луны, но различие элементных составов.

Как может происходить циклическое изменение климата



Восходящие потоки
массы и тепла

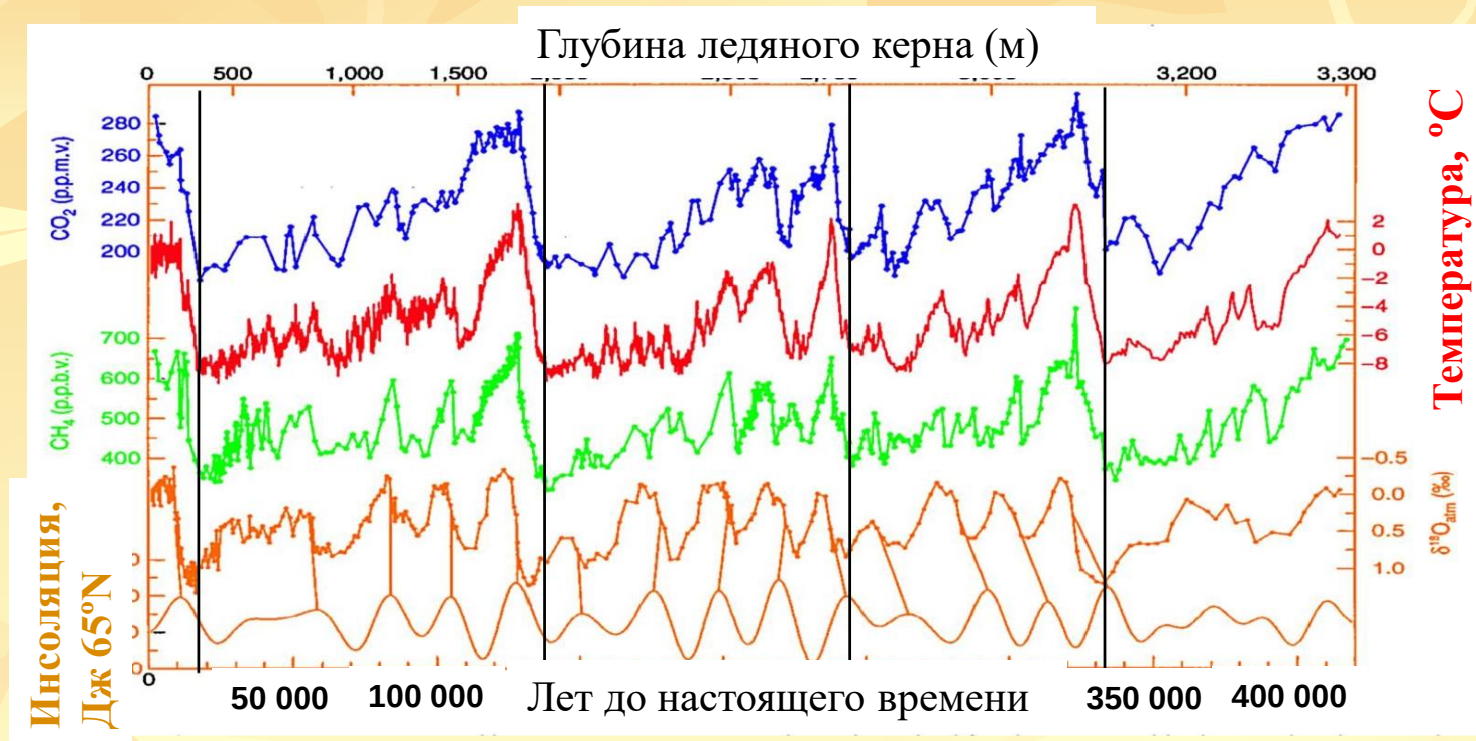
- С началом выделения ядерной энергии возникают потоки массы и тепла из ядра к поверхности Земли.
- С прогревом земной коры на дне океанов и в зонах вечной мерзлоты начинают разлагаться газогидраты с выделением метана – на порядок более парникового газа, чем CO_2 .
- С прогревом воды океанов все больше выделяется растворенного в воде парникового углекислого газа.
- Из-за положительных обратных связей потепление ускоряется.

- Рассеянные частицы актиноидов начинают вновь оседать на внутреннее ядро Земли. Поток тепла к поверхности падает, уменьшается поступление парниковых газов в атмосферу, начинается похолодание. Параллельно, в оседающих актиноидах, идет воспроизводство и накопление легкоделящихся изотопов (Anisichkin et al., 2008):



- Продолжительность климатических циклов определяется временем повторного оседания частиц актиноидов. Моделирование процесса с размером частиц диоксида урана около критического и ростом вязкости вещества ядра с глубиной от 10^2 Па с до 10^9 Па с приводит в расчетах к продолжительности цикла **около 130 тысяч лет**.
- Это согласуется с данными по изменениям климата за последние четыреста тысяч лет, полученными из ледяных кернов Антарктиды.

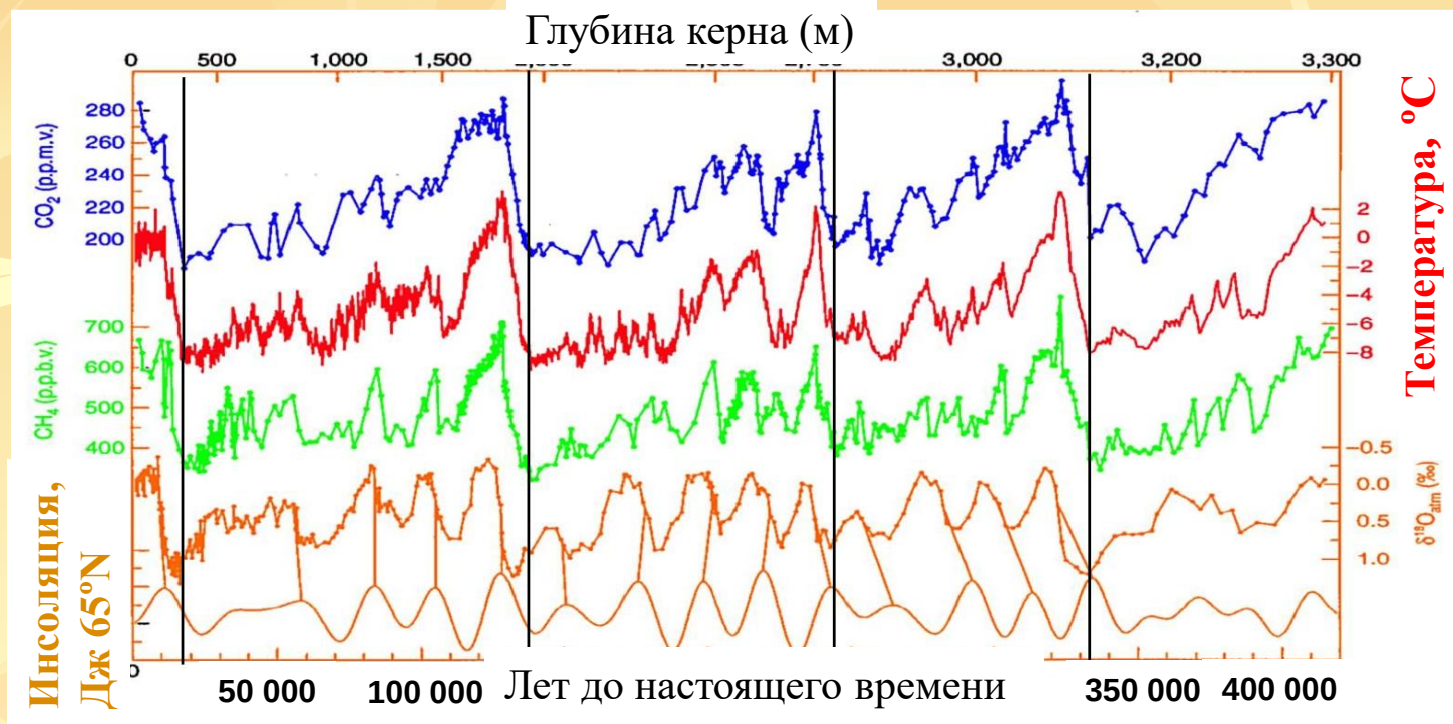
Изменения за 400 тыс. лет: содержания в атмосфере CO_2 , CH_4 , ^{18}O , тепла от Солнца (инсоляции) и температуры



Около **1.5 миллиона лет** назад Земля пережила радикальный климатический сдвиг. Планета уже входила и выходила из ледниковых периодов каждые **40 тыс. лет**.

Но потом **периоды стали контрастнее и длиннее (~ в два раза!)**, с монотонно увеличивающейся продолжительностью от **90 до 120 тыс. лет**, что никак не может объясняться циклами Миланковича — изменением инсоляции, расчетная длительность которых **постоянна** в таких временных масштабах.

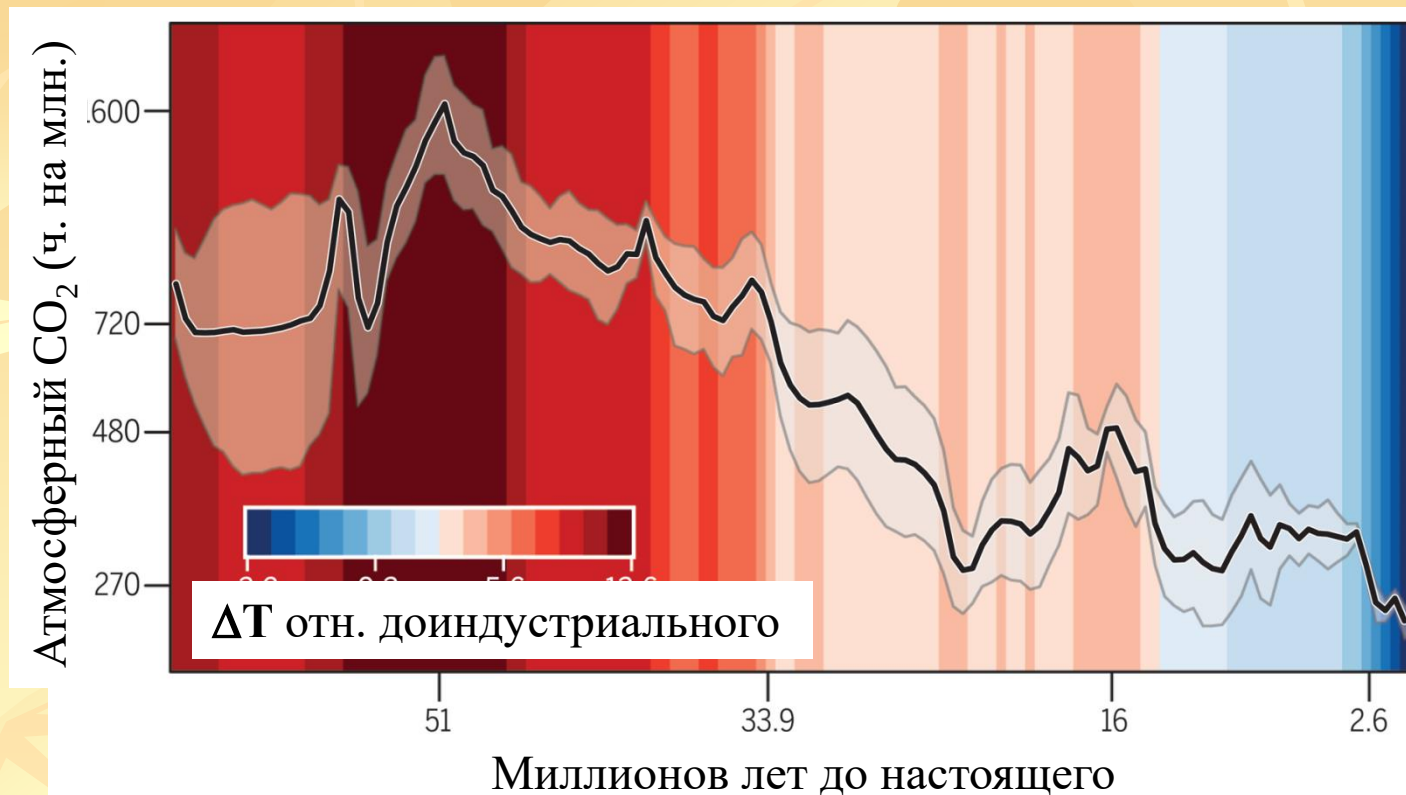
Как можно объяснить увеличение продолжительности циклов за последние 400 тыс. лет и резкое удлинение в два раза около 1.5 млн. назад?



Для начала цепных ядерных реакций достаточен слой актиноидов критической толщины, без оседания всех частиц на внутреннее ядро Земли. Но постепенное «выгорание», уменьшение содержания актиноидов требует все более полного, более продолжительного оседания частиц актиноидов. **Поэтому продолжительность климатических циклов со временем должна увеличиваться, что и наблюдается.**

Миллионы лет назад легкоделящихся изотопов было больше. Поэтому **в недрах Земли в разных местах могли независимо работать два геореактора.** Поэтому климатические циклы были в два раза короче, а климат теплее.

~ 5-50 млн. лет назад работало несколько геореакторов?



Ещё раньше, десятки миллионов лет назад **легкоделящихся изотопов было ещё существенно больше** и достаточно для независимых периодических протеканий цепных реакций в разных местах внешнего ядра Земли. Поэтому колебания температуры были меньше, хаотичнее, а климат намного теплее.

Вывод: изменение количества тепла, поступающего от Солнца, безусловно влияет на климат, но существенным является и поступление тепла из недр Земли.

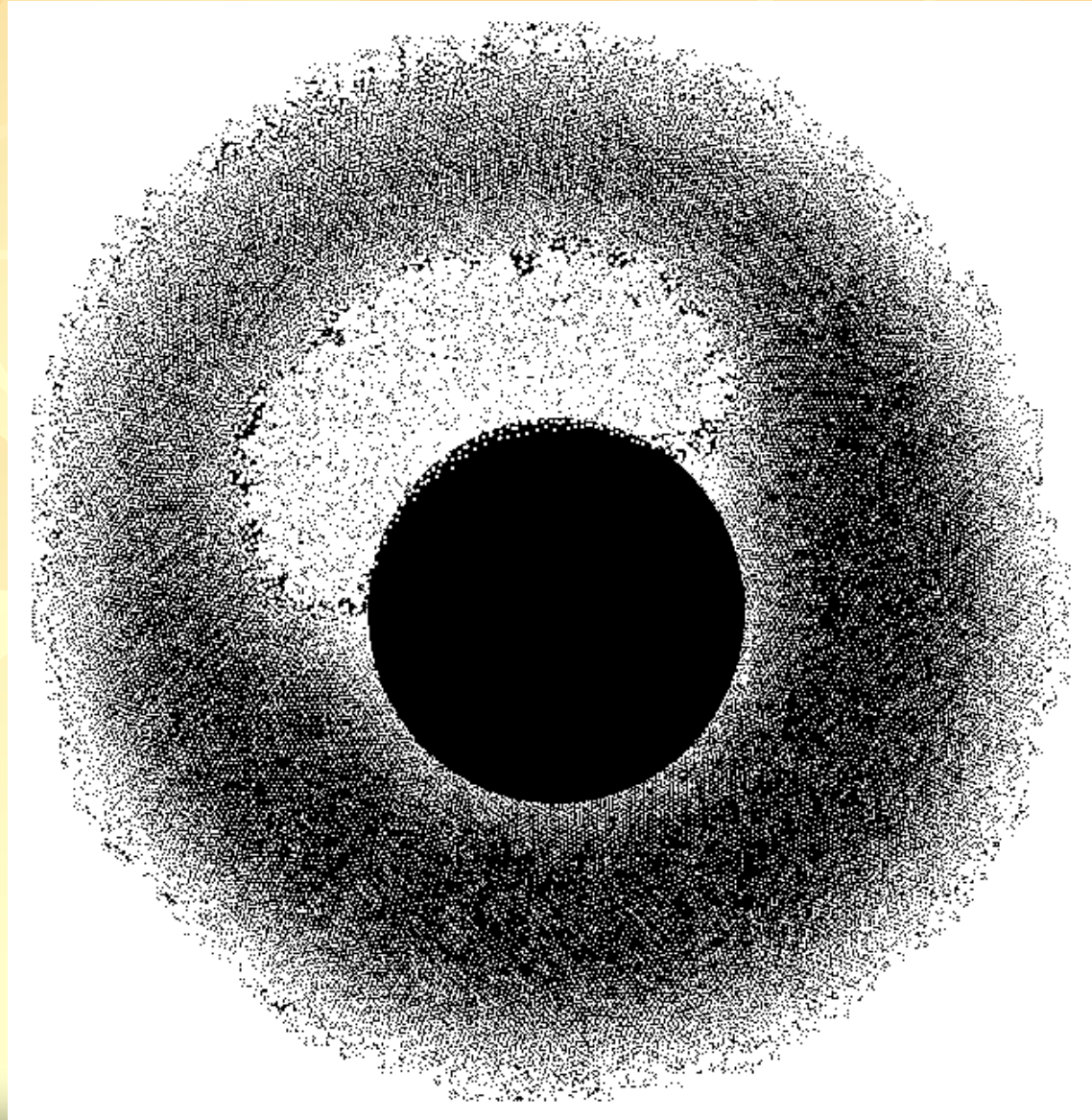
Возможные взрывные режимы цепных ядерных реакций в ядре Земли

- Чтобы слой осевших на твердое внутреннее ядро Земли актиноидов взорвался, необходимо быстро и глубоко перевести его в сверхкритическое состояние.
- Как показало моделирование, быстрое относительное уплотнение взвеси актиноидов может происходить в ударной волне от падения крупного астероида (Анисичкин, 1997; Воронин, Анисичкин, 2001).
- Также в (Митрофанов и др., 1999; 2001) рассматривается гетерогенная ядерная детонация на реакции деления.
- Также в плоском слое возможна цепная ядерная реакция в гравитационной волне уровня, другие механизмы?

Моделирование взрыва в недрах планеты

- Моделирование методами молекулярной динамики с числом частиц порядка 10^5 .
- Тела астероидного размера порядка **100 км**.
- Масса частиц ядра (железо) **в три раза больше** массы внешних частиц (силикаты).
- Суточное вращение планеты за **5 часов**.
- Мощность взрыва $\sim 10^{29}$ J или $\sim 10^{15}$ кг U. Это ~ 2 - 3% от содержания в Земле по: (McDonough, 2003).

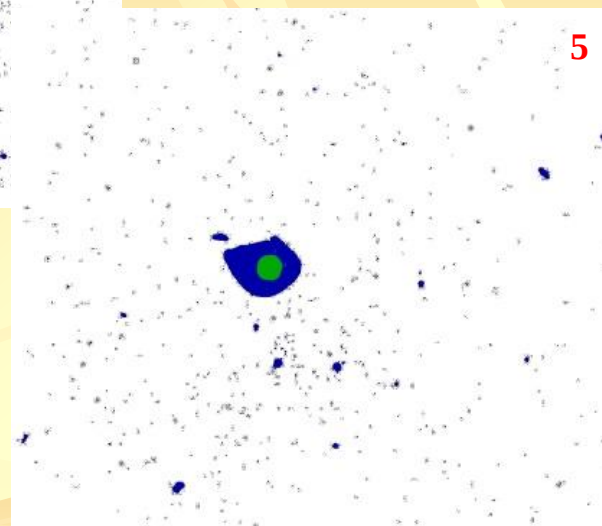
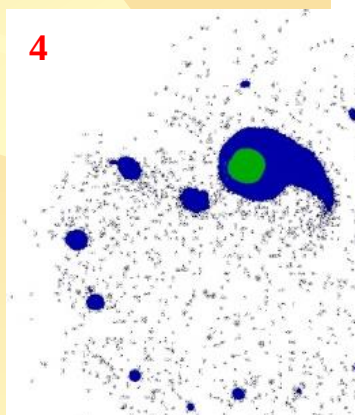
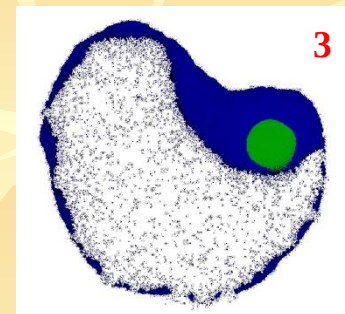
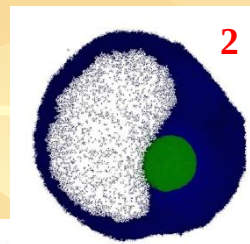
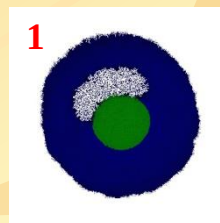
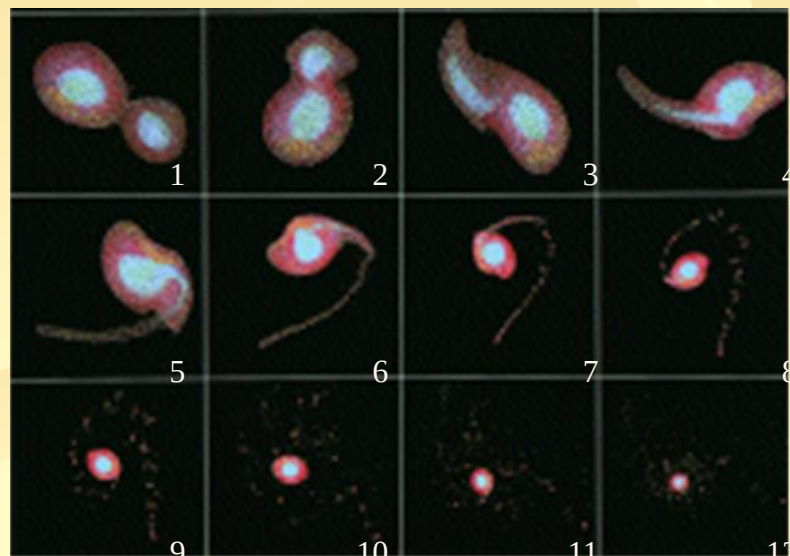
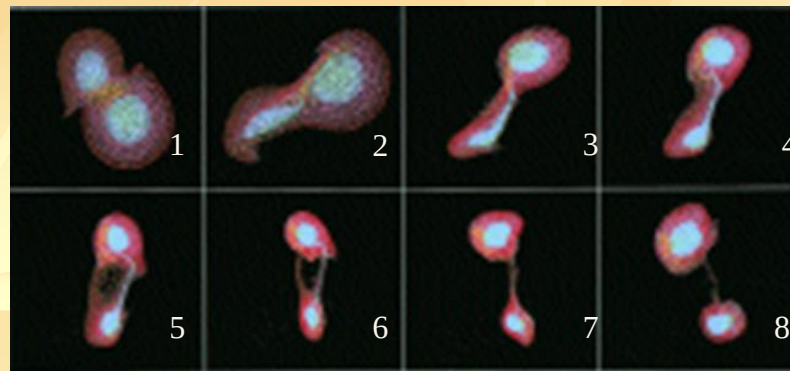
На рисунке начальная стадия взрыва (**~ 0.3 часа**).
(Anisichkin, Pruuvel, Rubtsov. 2019)



Происхождение Луны: «мегаимпакт» или «мегавзрыв»?

Столкновение планет

Взрыв в недрах планеты



При столкновении спутник образуется с заметным содержанием материала ударника, что не согласуется с известными данными по составу Луны. **При взрыве** - из земного вещества с наблюдаемым обеднением Луны легколетучими элементами.

■ Предложенные объяснения двух природных процессов из-за новизны и «необычности» вызывают недоверие, сомнения, и это естественно. В истории науки новые идеи, теории никогда не принимались сразу и безоговорочно. За некоторые даже наказывали, например, как генетиков-кибернетиков в недалеком прошлом нашей страны.

■ Но факты нельзя не учитывать. А факты заключаются в том, что цепными ядерными реакциями в недрах Земли более адекватно, чем существующими теориями объясняются такие глобальные явления как:

Циклические изменения климата с меняющейся продолжительностью и теплый климат десятки миллионов лет назад;

Происхождение Луны и некоторых спутников других планет (так спутники Марса, более вероятно, не захваченные астероиды, как принято считать, а выброшенные фрагменты его поверхности).

А также происхождение множества астероидов, комет, многократные изменения магнитного поля Земли.

А также...

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**