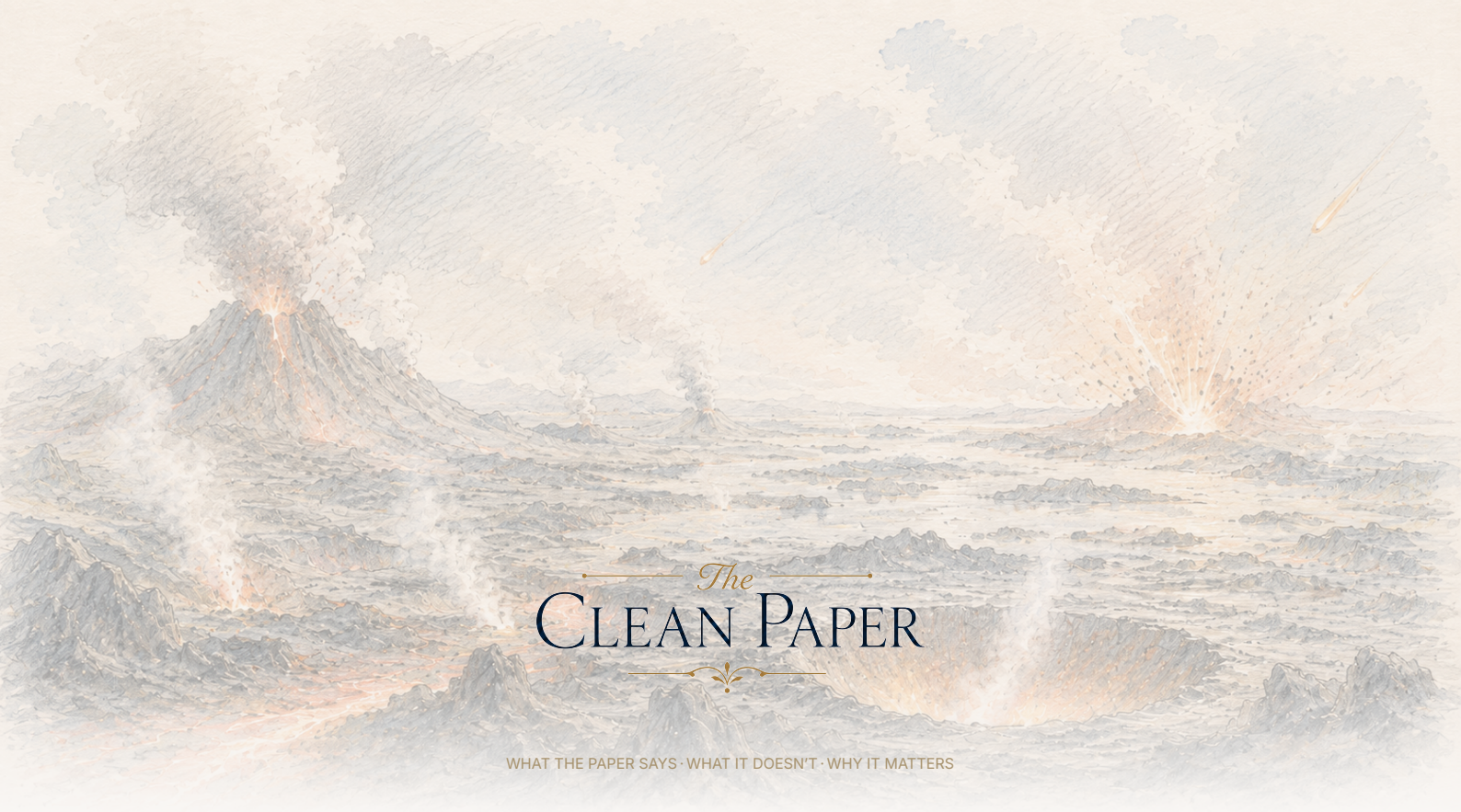


Тонкая, полурасплавленная первая кора: модель, в которой гадеем управляли удары, а не внутреннее тепло

Первый эон Земли, гадей, почти не оставил геологической летописи. Это моделирование спрашивает, какой была бы кора, если перестать игнорировать удары. С помощью стохастической убывающей модели потока столкновений и проверенных симуляций теплопереноса в коре и мантии авторы находят, что ударное тепло на протяжении большей части гадея превышало всё внутреннее тепло Земли как минимум на порядок, оставляя тонкую кору — менее ~5 км — частично расплавленной уже на глубине нескольких километров. По мнению авторов, она была слишком слабой для тектоники плит и постоянно перерабатывалась обратно в мантию, что могло бы объяснить почти полное отсутствие гадейских пород. Когда после ~3,9 Ga бомбардировка ослабевала, могла сформироваться устойчивая континентальная кора — примерно тогда, когда появляются самые древние сохранившиеся фельзические породы, что «вероятно, не случайность». Благодаря намеренно консервативным предположениям нижней границы качественный результат устойчив, хотя точные числа не фиксированы. Это сильная модель ранней Земли, а не прямое наблюдение.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Impact heating and the hidden Hadean*, Tim E. Johnson, Craig O'Neill, Simon Turner, Christopher L. Kirkland, Science (2026), 392:1408-1412 · DOI: 10.1126/science.aeb5402

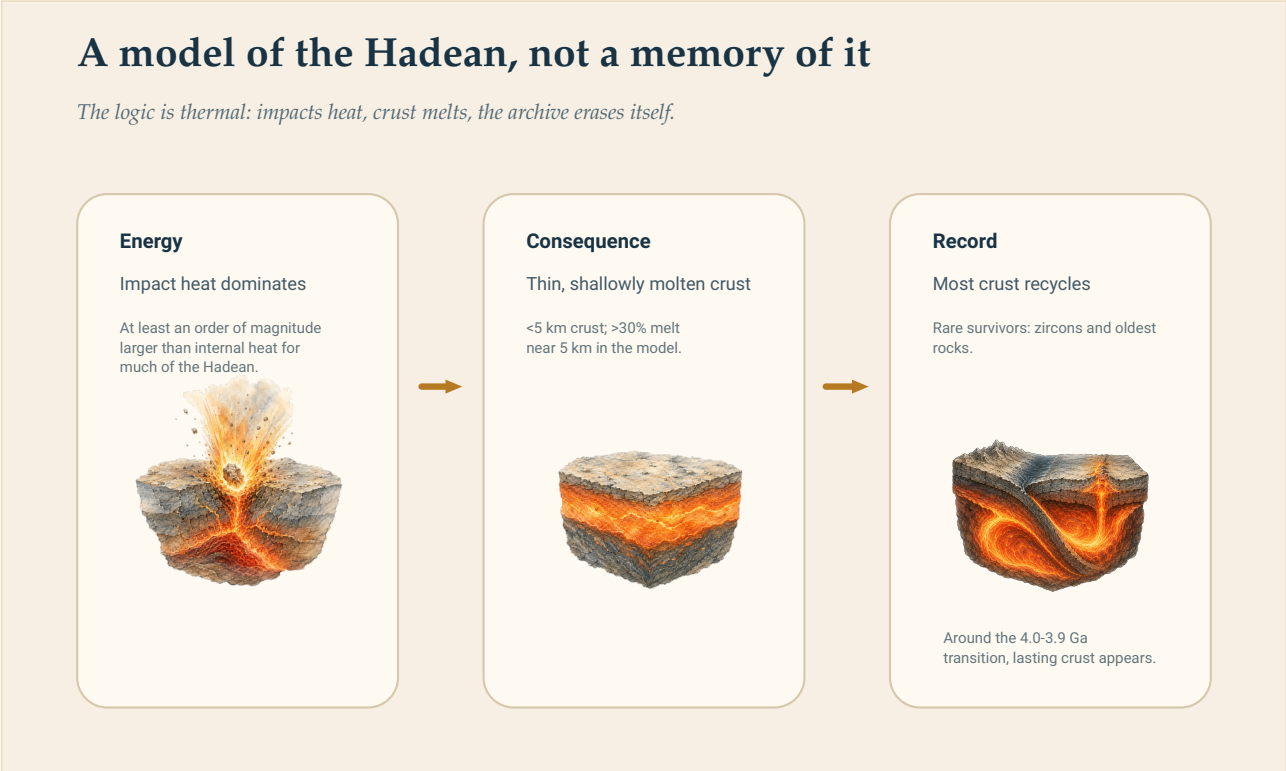
Глава истории Земли, от которой почти не осталось страниц

Земля — единственная известная нам планета с континентами: плавучими, богатыми кремнезёмом массивами суши, на которых мы живём. Но то, как впервые сформировались континенты, остаётся одной из древнейших нерешённых проблем геологии по жестокой причине: доказательства почти полностью исчезли.

Первый эон Земли, гадей, длился от рождения планеты до примерно 4,03 миллиарда лет назад (Ga). От тех первых полумиллиарда лет почти ничего не сохранилось. Самые древние целые фельзические породы континентального типа имеют возраст около 4,03 Ga. Несколько редких базальтовых пород достигают ~4,2 Ga. Самый древний материал любого типа — россыпь кристаллов циркона, наиболее известная из Jack Hills в Западной Австралии, возрастом до 4,4 Ga. Вот и весь архив детства Земли: горстка мест и минералы размером с песчинки.

Это исследование не добавляет в архив новую породу. Оно делает другое: строит физическую модель того, какой при этой физике должна была быть гадейская кора, и задаёт вопрос, который большинство моделей ранней Земли обходят. Что происходит, если перестать игнорировать факт, что раннюю Землю постоянно бомбардировали?

Вывод авторов поразителен. На протяжении большей части гадея тепло от столкновений должно было перекрывать всё внутреннее тепло Земли, оставляя кору тонкой и полурасплавленной — слишком слабой, по их аргументу, для чего-либо похожего на современную тектонику плит. Это модель, а не память пород. Но это модель, которая по крайней мере пытается учитывать насильственную физику эпохи, которую описывает.



В модели тепло от ударов доминирует в энергетическом балансе, тонкая неглубоко расплавленная кора постоянно перерабатывает сама себя, а устойчивая континентальная кора появляется лишь примерно на переходе 4,0–3,9 Ga. Это модель гадея, а не непосредственная запись о нём.

The Clean Paper CC BY 4.0

Что сделали авторы

Команда объединила три компонента, которые обычно рассматривают отдельно.

Во-первых, **стохастическую модель потока столкновений** — потока астероидов и более крупных тел, которые били по внутренней Солнечной системе в течение гадея и раннего архея. Важно: это не старая идея одного пика «Поздней тяжёлой бомбардировки». Здесь поток очень интенсивен вначале и **уменьшается со временем**, а крупные столкновения происходят случайно, стохастически, а не по расписанию. Модель масштабирована по статистике кратеров Луны и внутренней Солнечной системы и подобрана так, чтобы согласовываться с возрастными спектрами цирконов и доступными палеомагнитными данными.

Во-вторых, **геодинамические симуляции** переноса тепла через кору и верхнюю мантию. Авторы использовали проверенный lattice-Boltzmann код Planet_LB, запуская как простые одномерные расчёты температуры в зависимости от глубины, так и полные двумерные снимки конвекции мантии для 4,1 Ga. Они включают обычные внутренние источники тепла — радиоактивный распад и тепло ядра — а также, что важно, **магматическую адвекцию**: перенос тепла вверх восходящим расплавом,

который большинство тепловых моделей коры не учитывает.

В-третьих, **моделирование фазовых равновесий** для реалистичной ранней коры — гидратированного гадейского метабазальта из зеленокаменного пояса Nuvvuagittuq — чтобы определить, при какой температуре и глубине такая порода начинает плавиться.

Один методологический выбор важен для чтения всей работы: авторы намеренно сделали условия *неблагоприятными* для собственного вывода. Они предположили «нехондритовую» мантию — с меньшим количеством радиоактивных теплопроизводящих элементов, чем в хондритовом эталоне, — то есть менее чем с половиной внутреннего нагрева стандартной модели; использовали консервативные темпы нагрева и проигнорировали приливный нагрев от молодой и близкой Луны. Следовательно, рассчитанные температуры коры — **минимумы**, нижние границы. Если уж на то пошло, настоящий гадей должен был быть горячее модели.

Что они обнаружили

Энергетический баланс гадея определяли удары, а не внутреннее тепло. Если интегрировать тепло от столкновений во времени, оно значительно превышает внутренний вклад — как минимум на порядок на протяжении большей части гадея. В этой картине именно ударный нагрев, а не радиоактивный распад, является главным двигателем раннего тектонизма, и лишь после примерно **3,9 Ga** он становится второстепенным.

Это тепло держало кору тонкой и неглубоко расплавленной. Без ударов и адвекции расплава модель даёт гадейскую кору, частично расплавленную лишь ниже примерно 10–15 км. Добавьте тепло от ударов — и зона плавления резко поднимается: кора становится частично расплавленной уже на глубине всего **нескольких километров** — примерно ниже 2–5 км. На глубине около 5 км модели прогнозируют более 30% расплава: в таком состоянии порода слишком слаба, чтобы держаться как жёсткая плита. На 5–10 км температуры ~1000–1100°C означают значительное плавление коры почти независимо от её состава. Выживший твёрдый слой должен был быть **тоньше примерно 5 км**.

Полурасплавленная кора стирает сама себя. Значительное плавление позволяет более плотному материалу, богатому железом и магнием, опускаться и отделяться, тогда как более лёгкие, богатые кремнезёмом расплавы поднимаются. Со временем это смещает средний состав коры к более эволюционировавшим, кремнезёмистым композициям — и создаёт фельзический расплав, из которого может кристаллизоваться циркон. Затем почти вся эта тонкая кора должна была снова перерабатываться вниз в конвективную мантию, что согласуется с химической и изотопной летописью. В этой модели почти полное отсутствие гадейских пород — не пробел в записи, а *предсказание*. Породы возрастом 4,2 Ga и цирконы 4,4 Ga — редкие уцелевшие фрагменты коры,

которую в основном разрушали почти так же быстро, как она формировалась.

Конец бомбардировки совпадает с появлением первых устойчивых континентов. Когда бомбардировка ослабевала на переходе 4,0–3,9 Ga, кора наконец могла утолщаться и сохраняться. Самые древние сохранившиеся континентальные породы появляются примерно на том же переходе. Авторы формулируют осторожно: то, что устойчивая континентальная кора появилась примерно тогда же, «вероятно, не случайность».

Их главный вывод: при таких условиях — тонкая кора, расплавленная уже в нескольких километрах вниз — **тектоника плит в гадее маловероятна.**

Они также показывают, почему предыдущие работы приходили к противоположному выводу. Более ранние исследования стохастических ударов находили лишь небольшой эффект: в любой момент плавилось менее 2,5% коры. В тех работах отсутствовали два компонента, которые есть здесь: глобальное влияние крупных столкновений на плавление глубоко в мантии и перенос этого тепла вверх восходящей магмой. Если вернуть их в модель, тепловая картина меняется радикально.

Почему модель — не память

Всё выше — выход симуляций, а не показания, снятые с гадейских пород, потому что этих пород почти не существует. Это не делает результат слабым, но точно определяет его тип.

Цепочка такова: *модель* потока ударов питает *модель* теплопереноса в мантии и коре, которую проверяют относительно *модели* плавления конкретной породы. Каждое звено физически мотивировано и, где возможно, проверено — но в целом это цельный аргумент о том, каким гадей *должен был* быть при правдоподобной физике, а не измерение того, каким он *был*.

Именно поэтому консервативные предположения авторов важнее, чем может показаться. Они выбрали нагрев на нижней границе и всё равно получили повсеместно расплавленную неглубокую кору, поэтому качественный вывод — гадейская кора была горячей и слабой — устойчив к их выбору. А вот точные числа эта работа не фиксирует: конкретные геотермы, доли расплава, толщину коры. Направление результата следует читать как сильное, десятичные знаки — как предварительные.

Чего эта работа *не* доказывает

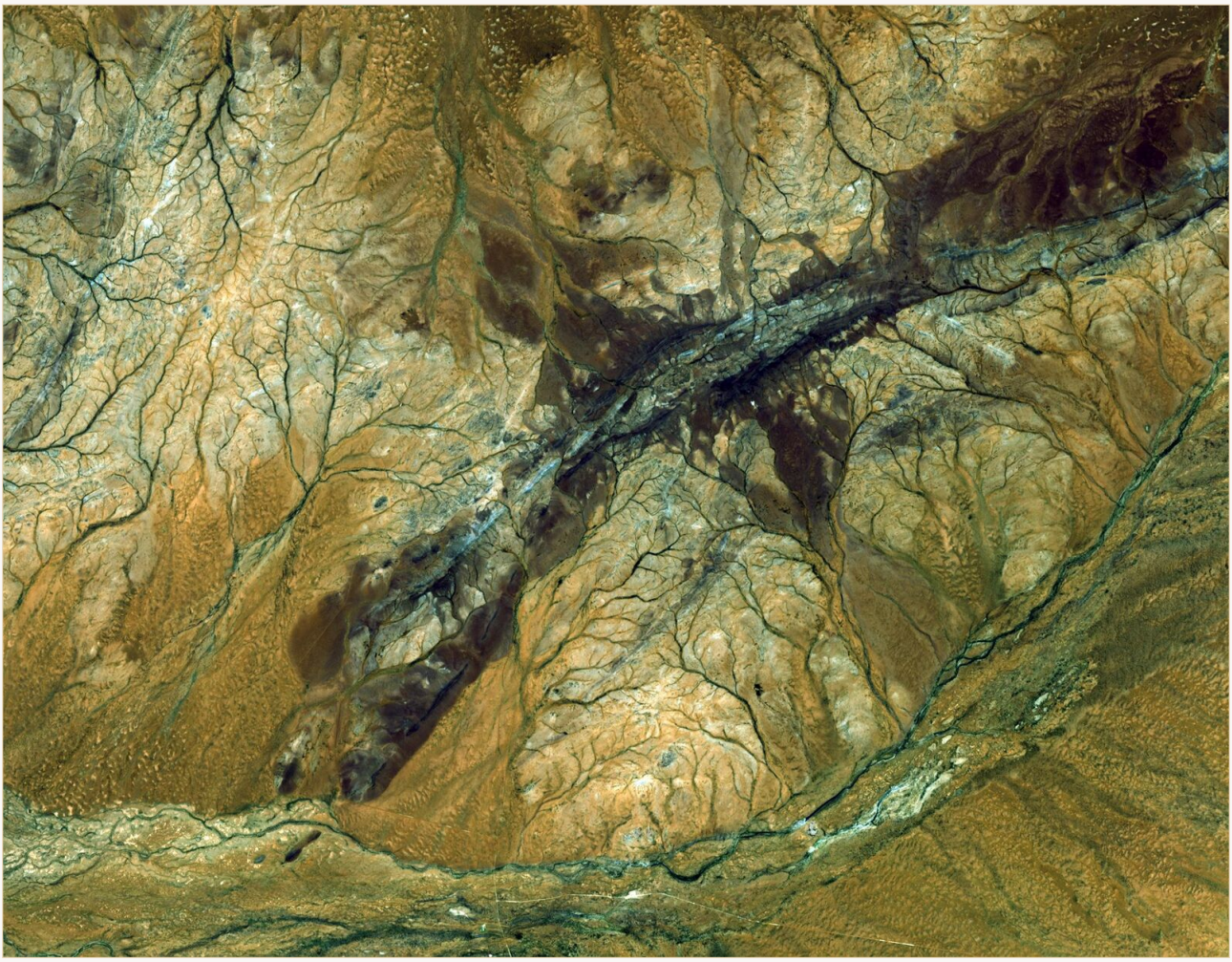
- Она **не** наблюдает гадейскую кору напрямую. Пород этой эпохи почти нет; это результат моделирования того, что следует из физики, а не измерение.
- Она **не** опирается на «Позднюю тяжёлую бомбардировку». Использованный поток ударов убывающий и стохастический — модели не нужен и в неё не вводится

внезапный пик бомбардировки.

- Она **не** закрывает спор о тектонике плит. «Маловероятна» здесь — сильный, физически обоснованный вывод в пользу ранней Земли с неподвижной или «мягкой» крышкой, но режим тектоники гадея по-прежнему реально обсуждается.
- Она **не** доказывает, что именно удары *вызвали* появление континентов на переходе 4,0–3,9 Ga. Совпадение во времени — сильная ассоциация, которую авторы называют «вероятно, не случайной». Это осторожная формулировка убедительной корреляции, а не продемонстрированная причинность.
- Цирконы Jack Hills — **не** сохранившиеся континенты. Это редкие уцелевшие зёрна, показывающие, что фельзический материал и вода существовали очень рано; центральный тезис модели именно в том, что кора, которая их создала, в основном была переработана.
- Работа **не** воспроизводит полную историю ранней Земли. Симуляции идеализированы — одномерные профили и двумерные экваториальные срезы с ударами вблизи экватора, представленные как отдельные временные снимки, — а не полная четырёхмерная модель планеты.

Насколько убедительны доказательства?

Для центрального утверждения — что ударный нагрев был фактором первого порядка для гадейской коры, удерживая её тонкой и неглубоко расплавленной, — аргумент последователен и, в важном смысле, консервативен. Он использует проверенный геодинамический код, физически правдоподобные входы и предположения нижней границы, а также добавляет источник тепла, который большинство предыдущих моделей просто игнорировало. Дополнительную уверенность даёт то, что одна картина объясняет сразу два упрямых факта: почему почти не сохранилось пород старше ~4 Ga — из-за почти полной переработки — и почему устойчивая кора появляется именно тогда, когда бомбардировка ослабевает.



Jack Hills в Западной Австралии на снимке инструмента ASTER NASA. Цирконы из этого региона относятся к самому древнему известному материалу, сохранившемуся от ранней земной коры, — крошечные подсказки из эона, породы которого почти полностью стёрлись.

NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team fair-use

Границы столь же ясны, и это границы любой модели глубокого прошлого: здесь модели стоят на моделях, привязанных к чрезвычайно бедной геологической летописи, а самый заметный вывод — «тектоника плит маловероятна» — является интерпретацией, а не наблюдением. Правильная позиция — считать это сильной, хорошо аргументированной гипотезой, которая переформатирует картину гадея и теперь приглашает других проверять её предположения, особенно выбор модели потока столкновений, а не закрытым делом.

Самый полезный итог — не «вот каким был гадей» и не «это лишь симуляция». Он такой: при правдоподобной, консервативной физике ранняя Земля под сильной бомбардировкой должна была иметь тонкую, полурасплавленную, самоперерабатывающуюся кору — и одна эта идея объясняет удивительно многое из того малого, что мы действительно можем увидеть.

Почему это важно

Популярный образ ранней Земли часто колеблется между двумя крайностями: спокойный водный мир с тектоникой плит, почти как сегодня, или адская лавовая планета. Эта работа рисует конкретную, физически мотивированную середину: тонкая кора, которая снова и снова плавилась уже на глубине нескольких километров, непрерывно разрушалась и формировалась заново, а правила задавали удары, а не внутреннее тепло.

Такое переосмысление действительно что-то объясняет. Оно предлагает один механизм для двух главных фактов о детстве Земли — почти полного отсутствия геологической летописи и времени появления первых устойчивых континентов — и ставит в центр процесс, который часто игнорируют: ударный нагрев. Если картина выдержит проверку, она изменит то, как мы рассуждаем о моменте, когда Земля вообще стала планетой со стабильными континентами, и будет иметь последствия для других каменистых миров, формировавшихся под собственными бомбардировками.

Для этого модель не обязана быть последним словом. Ей достаточно быть достаточно хорошей гипотезой для проверки — и, привязываясь к сохранившейся летописи цирконов и изотопов, она таковой является. «Скрытый гадей» в названии — буквально суть: эпоха, до которой мы в основном можем добраться лишь моделированием, потому что она стёрла собственные доказательства.

Краткий итог

Первый эон Земли, гадей — до ~4,03 Ga, — почти не оставил геологической летописи. Это моделирование спрашивает, какой должна была быть кора, если добавить источник тепла, который обычно упускают: удары. Использовав стохастическую убывающую модель потока столкновений вместе с проверенными 1D- и 2D-симуляциями теплопереноса в коре и мантии — включая тепло, которое несёт восходящий расплав, — авторы находят, что интегрированное во времени ударное тепло превышало всё внутреннее тепло Земли как минимум на порядок на протяжении большей части гадея. Следствие — тонкая кора, менее ~5 км, частично расплавленная уже в нескольких километрах вниз и на глубине ~5 км расплавленная более чем на 30%: слишком слабая для поддержания тектоники плит, которую авторы считают маловероятной в гадее. Такая кора в основном перерабатывалась бы обратно в мантию, объясняя, почему так мало гадейского материала сохранилось. Когда удары ослабевали на переходе 4,0–3,9 Ga, могла формироваться устойчивая континентальная кора — примерно тогда, когда появляются древнейшие сохранившиеся фельзические породы, что, по осторожным словам авторов, «вероятно, не случайность». Поскольку они намеренно использовали консервативный нагрев нижней границы, качественный вывод достаточно устойчив, даже если точные числа не фиксированы. Это сильная, цельная модель детства Земли — не прямое наблюдение за ним.

Проверка без прикрас

Что показывает статья: В физически обоснованных симуляциях, включающих ударный нагрев и магматический перенос тепла, гадейская кора получается тонкой и частично расплавленной уже в нескольких километрах вниз, с доминированием ударного, а не внутреннего тепла, преимущественной переработкой обратно в мантию и — в пределах этой модели — неспособностью поддерживать тектонику плит.

Что правдоподобно, но не доказано: Что именно удары являются причиной появления устойчивых континентов около 3,9 Ga; что гадей был миром с неподвижной или «мягкой» крышкой, а не ранней тектоникой плит; что почти полное отсутствие гадейских пород вызвано именно переработкой расплавленной коры.

Чего она не показывает: Прямого измерения гадейской коры; окончательного ответа в споре о тектонике плит; доказанной причинной связи между затуханием бомбардировки и первыми континентами; что цирконы Jack Hills являются сохранившимися континентами; полной модели ранней планеты.

Главные ограничения: Геологической летописи гадея почти нет, поэтому результат является моделью, ограниченной очень малым количеством данных; здесь модели накладываются на модели — поток ударов → геодинамика → фазовые равновесия; сам поток ударов является репрезентативным, но неопределённым выбором; симуляции идеализированы — 1D и 2D экваториальные срезы, отдельные моменты времени. Консервативные предположения нижней границы укрепляют качественный вывод, но не делают конкретные геотермы точными.

Какой уверенности заслуживает вывод для широкого читателя? Высокой в том, что при правдоподобной физике сильно бомбардируемая ранняя Земля должна была иметь горячую, тонкую и неглубоко расплавленную кору. Умеренной в том, что это делает гадейскую тектонику плит маловероятной и объясняет отсутствующую геологическую летопись. Низкой относительно любого утверждения, что это *доказывает*, как сформировались континенты или когда именно. Это сильная, консервативная модель, переосмысляющая гадей, а не прямой взгляд на него.

Источники

Johnson, O'Neill, Turner & Kirkland, Science 392:1408-1412 (2026)
https://doi.org/10.1126/science.aeb5402