

5

Земля как сложная саморегулирующаяся система*

Леонид Ефимович Гринин

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»;
Институт востоковедения РАН

В статье анализируется Земля как сложная и саморегулирующаяся система как с точки зрения геологических, так и с точки зрения общеэволюционных аспектов. Подробно анализируется структура Земли с позиции системного подхода, саморегуляции и эволюции нашей планеты. Анализируются планетарные геотектоника и геодинамика, основные силы, энергетические источники, потоки, типы взаимодействия вещества и геосфер и другие факторы и явления, которые оказывают влияние как на поддержание баланса, так и на геологическую эволюцию. Показываются достоинства и ограничения ведущих теорий, объясняющих глобальную тектонику и динамику, эволюцию планеты. Анализ структуры и геодинамики Земли дается на фоне сравнения с другими планетами, общеэволюционных правил и идей; показывается, как важнейшие проявления, формы, паттерны геологической эволюции вписываются в характеристики эволюции нашего мира и Универсума в целом. Статья будет интересна всем, кто интересуется эволюцией, особенно геологической эволюцией и ее местом в мегаэволюции.

Ключевые слова: эволюция, геологическая эволюция, системность, структура Земли, геосферы, тектоника плит, геодинамические системы, кора, мантия, ядро, геотектоника, геодинамика.

1. Системный подход к исследованию Земли в аспекте эволюции

Развитие систем и эволюция. Развитие систем, самоорганизация материи в сложные системы, эволюция систем и образование в них подсистем

* **Для цитирования:** Гринин Л. Е. 2025. Земля как сложная саморегулирующаяся система. Эволюция: Грани эволюции / Отв. ред. Л. Е. Гринин, А. В. Коротаев. Волгоград: Учитель. С. 116–167. DOI: 10.30884/978-5-7057-6518-8_05.

For citation: Grinin L. E. 2025. The Earth as a Complex Self-Regulating System. *Evolution: Edges of Evolution* / Ed. by L. E. Grinin, A. V. Korotayev. Volgograd: Uchitel. Pp. 116–167 (in Russian). DOI: 10.30884/978-5-7057-6518-8_05.

со сложными взаимосвязями – это важнейшие проявления, формы, паттерны, способы существования и эволюции нашего мира, Универсума в целом. К этому также надо добавить еще очень многое: самосохранение и саморегулирование систем, их взаимодействие с окружающей средой и другими системами, объединение их в более крупные системы и многое другое. В процессе формирования и развития систем, их жизненных циклов, смерти и т. д. происходят заметные изменения в них. И поскольку каждая система определенного вида, хотя и похожа на аналогичные, но в то же время является уникальной, цикл обновления систем (то есть замены разрушенных и умерших на новые) в итоге дает эволюционное развитие. Появляются новые типы звезд и галактик, планет и других небесных тел, минералов и веществ, видов животных, форм организации обществ, новые формы информации и т. д. В геологической истории Земли также каждый цикл изменений, каждая фаза геологических циклов вела к эволюционным изменениям. Так, с каждым этапом горообразования, возникновения и распада суперматериков, с каждой трансгрессией и регрессией морей мощность отложений платформ и геосинклиналей возрастает, и в ходе геологической истории увеличивается мощность земной коры континентального типа (Владимирская и др. 1985: 399).

Иногда при таком обновлении возникают редкие, уникальные ситуации, которые могут реализовать эволюционное преимущество и продвинуть эволюцию вперед. Так случилось с планетой Земля, где в особых условиях быстро развивалась химическая, а затем абиотическая эволюции (Hazen *et al.* 2008; Hazen, Wong 2024; Brack *et al.* 2010; Гринин 2020; 2024; Grinin 2024; 2026a). Также для многих эволюционирующих систем характерны как достаточная устойчивость, так и изменения (включая и инновационные), что позволяет развивать системы с возрастающим порядком и сложностью. Это частично объясняет, почему множество космических процессов эволюционирует с течением времени. Это можно наблюдать от звезд, которые химически более обогащены, чем их предшественники, до форм жизни на Земле, которые биологически более сложны, чем их предки. Некоторые исследователи формулируют это как «закон возрастания функциональной информации». Под функциональной информацией они понимают меру возрастающей упорядоченности и сложности (Wong *et al.* 2023). Это можно было бы более точно назвать законом возрастания сложности. См. о росте сложности: (LePoire *et al.* 2025; 2026).

Причины необратимости эволюции, роста сложности систем, ускорения темпа эволюции многообразны, и, конечно, они объясняются не одним законом, а сложным комплексом законов, паттернов, правил, роста эволюционной памяти и т. п. Тем не менее мы наблюдаем рост сложности и другие проявления развития и эволюции. И наша планета дает тут прекрасный и во многом уникальный пример. Она демонстрирует всю палитру, характерную для эволюции систем: самоорганизацию, аккумуляцию

и расходование энергии, рост структурной сложности, включая постоянное развитие подсистем, взаимодействие в рамках более крупной (Солнечной) системы, большую устойчивость и одновременно изменчивость, постоянное обновление и создание новых механизмов, оболочек, а также многое-многое другое.

Системогенез и переход на новый уровень. В то же время стоит иметь в виду важный момент. Каждый новый уровень, прежде чем он проявит себя как принципиальное новшество, как новый уровень, довольно длительное время еще не демонстрирует ярко нечто в корне новое, а представляет собой как бы продолжение предшествующих уровней в пространстве ограниченных комбинаций (Лима-де-Фариа 1991: 353). Мы бы сказали, что сначала идет сверхразвитие предшествующих направлений, использование преадаптаций (то есть качеств, приспособлений, свойств, которые не играли решающей роли на предшествующих уровнях, но становятся мостиком для перехода к новому), исключительных условий и т. п. И уже потом из этого узкого канала к новому уровню начинает развиваться более сложная система, которая с каждым разом проявляет все более новые и небывалые прежде свойства. Постепенно это сверхразвитие оформляется уже в новый уровень. Сказанное касается и Земли, которая обладает определенными преимуществами по сравнению с другими планетами Солнечной системы (см. о них: Гринин 2017; Grinin 2018; 2025a; см. также: Grinin 2025b; 2026b). По мере ее остывания и формирования коры потенциальные преимущества Земли стали складываться в эволюционные преимущества. При этом, даже если не рассматривать сейчас зарождение жизни, следует отметить как очень важное движение Земли вперед в плане разнообразия минералов по сравнению с другими планетами и тем более с космосом (Hazen *et al.* 2008; Hazen, Wong 2024; Hazen, Sverjensky 2010; Гринин 2020; Grinin 2026a)¹, а также ее скорость в процессе системогенеза, в формировании многочисленных оболочек, постепенной выработке механизма тектоники литосферных плит и др. Таким образом, системогенез – это процесс, который сопровождает Землю с самого начала. Он имел место и на других планетах, на Марсе зашел достаточно далеко, в частности в отношении гидросферы (Сиротин 2009: 101; Язев 2018: 119), но затем остановился и стал откатываться, произошла деволюция планеты.

Земля как единый объект. Отметим, что в геологической эволюции мы имеем дело с единым объектом, а не с массой объектов, как в космической или планетной, биологической или социальной эволюции. Конечно, по отношению к биосфере и человечеству в каком-то смысле можно говорить об эволюции единого объекта. Но все же это единство больше (или, по крайней мере, в значительной степени) теоретическое. А един-

¹ В настоящее время число известных космических минералов достигает 400, на планетах это число заметно больше, на Земле измеряется тысячами.

ство Земли как неделимой целостной системы вполне очевидно (см. об этом: Grinin 2025c).

Земля – единая саморазвивающаяся система, для которой характерно сложное оболочечное строение, динамическая активность, направленность и цикличность развития (Салихов 2005: 42). В работе (Kump *et al.* 2010) Земля определяется как интегрированная система компонентов и процессов, где атмосфера, гидросфера, литосфера, биосфера и криосфера функционируют как единое целое через сложную сеть физических, химических и биологических процессов. Понятно, что в отношении поверхностных геоболожек системность более наглядна и изучена. Однако в систему взаимодействия органически и мощно различными и сложными путями включены мантия, внешнее и внутреннее ядра и другие структуры Земли. Наличие ядра в Земле и некоторых планетах позволяет нам относить их к многочисленному ряду систем и образований, наделенных центром (*Ibid.*), который в разных системах играет разную роль, но всегда значимую². Стоит добавить, что с каждым годом мы все больше узнаем о новых системных связях Земли, от ее ядра до ионосферы. Хотя влияние глубинных слоев Земли нам еще в очень многом неясно, но оно огромно.

Эмерджентность. Усложнение как результат изменений объясняется многими причинами, включая взаимодействие со средой, отбор и т. п.; но также и самим процессом усложнения, который приводит к тому, что называется эмерджентностью. Такой подход основан на понимании того, что свойства системы не могут быть полностью объяснены через изучение отдельных компонентов, но возникают в результате их взаимодействий (Steffen *et al.* 2004). Суть этого понятия в том, что в результате из взаимодействия простых / менее сложных элементов спонтанно возникают более сложные структуры и свойства более высокого уровня. И так процесс может продолжаться довольно долго. Происходит возникновение новых и/или более сложных свойств и структур при взаимодействии компонентов системы. Это называется «эмерджентный эффект» – скачкообразное появление нового необычного свойства в системе как результат кооперативного взаимодействия всех ее элементов, когда вне системы у отдельно взятого элемента такие свойства не проявляются (Салихов 2005).

Принцип эмерджентности фундаментален, универсален и характерен для всех уровней эволюции. При этом он способствует подготовке к переходу к новому качеству и/или уровню эволюции/сложности. Естественно, принцип эмерджентности проявляется также в функционировании Земли как системы и ее эволюции. Так, изменение состава атмосферы в истории Земли, в частности накопление кислорода, а также углеродные циклы создают сильные изменения в других сферах, включая климат, гидросферу,

² Можно констатировать универсальность структуры и организации с центром как начальной основы, упорядочивающей сердцевину и конечной вершины (Ретеюм 1988).

биосферу, что развивает эмерджентные свойства системы Земля, возникающие из взаимодействий между геосферами (Kasting 1993). В (Bercović 2003) тектоника плит рассматривается как эмерджентное свойство конвектирующей мантии, где из температурных неоднородностей возникают дискретные литосферные плиты с характерными границами. Таким образом, указанные принципы и подходы делают ее особенно релевантной для понимания глобальных изменений и эволюционных процессов. Стоит отметить, что в настоящее время довольно быстро развивается системное междисциплинарное направление, складывающееся в науку о Земле (ESS), которая направлена на понимание структуры и функционирования нашей планеты как сложной адаптивной системы, при этом делая упор на в целом очевидную в теории, но часто упускаемую в конкретных исследованиях идею, что понимание любого отдельного компонента требует знания о том, как он взаимодействует с другими компонентами системы.

2. Некоторые эволюционные соображения. Роль среды, границ и оболочек

Самоорганизация и самосборка. Объекты существуют не вечно, то есть они должны в какой-то момент образоваться. И при их образовании, какое может осуществляться разными путями, для нас особо важным будет понятие самоорганизации. В самом простом определении это процесс образования упорядоченных пространственных и пространственно-временных структур, плотно взаимодействующих между собой, из неупорядоченных элементов и материи (хаоса) под воздействием в основном внутренних процессов и сил, что ведет к образованию сложной системы (см. также: LePoire *et al.* 2026). В отношении Земли мы подробно описывали этот процесс самоорганизации планеты (см.: Гринин 2017; 2020; см. также: Grinin 2025a). Некоторые исследователи используют термин «самосборка» для обозначения более высокого уровня процесса самоорганизации (см., например: Лима-де-Фариа 1991). Самосборка не может происходить без определенной совместимости элементов, а то и соответствия четким параметрам (так, кристаллизация требует определенных размеров атомных ядер элементов). И хотя процесс кристаллизации (то есть перегруппировки беспорядочно расположенных частиц в регулярную кристаллическую постройку) всегда вызывает восхищение таким творчеством природы, в целом этот процесс обосновывается энергетическими преимуществами, которые и ведут к созданию систем³.

³ Причина кристаллизации заключается в том, что энергетически наиболее выгодно (при определенных условиях) такое состояние, при котором силы, действующие между частицами, окажутся уравновешенными, а это достигается лишь в случае упорядоченного расположения материальных частиц (Егоров-Тисменко 2005: 203). При этом идет формирование кластеров и объединение частиц в агрегаты, а затем происходит морфологический отбор упорядоченных агрегатов путем разрушения менее упорядоченных форм молекулами

Самоорганизация, в свою очередь, может быть рассмотрена как более длительный, чем самосборка, процесс. Но в целом оба термина можно, мы думаем, использовать как синонимы. Самоорганизация и самосборка присутствуют везде и на всех уровнях эволюции. А. Лима-де-Фариа считает, что самосборка представляет собой очевидное следствие автоэволюции. Она наблюдается на всех уровнях – от элементарных частиц до организмов. Самосборка – автоматический и в рамках мегаэволюции иерархический процесс. Элементарные частицы объединяются в атомы, атомы образуют макромолекулы, макромолекулы – клеточные органеллы и клетки, клетки объединяются в организмы, а организмы – в сообщества. Самосборку вирусов, рибосом, губок и вен человека можно воспроизвести экспериментально. Сообщества животных и человека создаются путем самосборки организмов, подобно тому как организмы образуются путем самосборки клеток (Лима-де-Фариа 1991: 357)⁴.

Теперь отметим, что с образованием звездно-галактической структуры Вселенной появляются макрообъекты, которые начинают полномасштабно взаимодействовать со средой, на многие порядки превышающей их по размерам (Гринин 2013: 14).

Самоорганизация происходит на разных иерархических соподчиненных уровнях (от атомов до массивов горных пород и геосфер), при этом конкретные и реальные механизмы самоорганизации в различных средах различны (на макро- и микроуровнях). В одних случаях они дискретны, в других – имеют кооперативный характер. В частности, происходит самоорганизация залежей полезных ископаемых, особенно рудных. Так, рудоносная система может развиваться в блоке земной коры, в котором происходят процессы извлечения рассеянных (рудных) элементов из области с кларковыми (то есть средними) концентрациями, перенос этих элементов и осаждение в концентрированном виде (рудные тела). Таким образом идет эволюция рудной системы в результате переноса элементов из области их низкой концентрации в область с высокой концентрацией при помощи транспортного тела (гидротермальный раствор, расплав, газ) (Салихов 2005).

Земля как самоорганизующаяся система. Но в настоящей статье нас интересует Земля в целом как самоорганизующаяся система, со способностью к воспроизводству антиэнтропийных состояний и с накоплением

среды (разрушаются агрегаты, у которых зазор между частицами больше, а, следовательно, сила притяжения частиц друг к другу меньше). См. также: (Мелихов 2018: 28).

⁴ В этом плане процесс самосборки есть проявление сформулированного нами правила эволюционной блочной сборки, в результате которой уже опробованные блоки, подсистемы, «узлы» используются при формировании новых систем (организмов) в готовом виде, целиком. Такая «блочная сборка» резко ускоряет темпы эволюции (Гринин и др. 2008: 64; Grinin *et al.* 2025; 2026). Одними из первых таких «блоков» стали атомы и молекулы, в известной мере ими являлись сгустки молекулярных пылегазовых облаков, из которых образуются звезды и планетезимали.

ем запаса потенциальной энергии (Салихов 2005). Наиболее активные процессы самоорганизации происходили, конечно, в начальный период образования Земли как планеты (то есть процесса аккреции) и первые сотни миллионов – первые миллиарды лет ее истории, когда шла дифференциация вещества, образование геосфер и т. п. (см. подробнее: Гринин 2017; 2020; Grinin 2018). Показателем геологической эволюции в общем случае, как считают некоторые исследователи, можно считать степени дифференциации системы (Виньковецкий 1971: 7). Дифференциация системы и в целом является показателем развития эволюции и высоты организации системы (Шмальгаузен 1961: 106). Здесь вполне применима формула Г. Спенсера, о которой мы не раз говорили в своих работах: от простого к сложному, от однородного (недифференцированного) к разнородному (дифференцированному), от бесструктурности к структуре (Spencer 1862; 1896; см. также: Гринин 2013; 2017; 2020; Grinin, Korotayev 2023).

В итоге результатом самоорганизации стало внутреннее и внешнее структурирование Земли, то есть неравновесное упорядочение вещества всей Земли и ее отдельных оболочек под воздействием совокупности внешних и внутренних факторов. Это можно назвать откликом системы Земля на кинетику неравновесных процессов. Понятно, что в основе самоорганизации лежит затрата и рассеивание (диссипация) энергии из недр планеты, которая сопровождается самоорганизацией на разных масштабных уровнях. Таким образом, Земля в целом – самоорганизующаяся система с накопленным запасом потенциальной энергии, способная к воспроизводству антиэнтропийных состояний (Салихов 2005). Однако, конечно, антиэнтропийные механизмы способны уловить только часть диссипированной энергии, остальная часть уходит в пространство (то есть полностью остановить энтропийные процессы невозможно). Далее процесс самоорганизации перешел в процесс саморегуляции (Гринин 2016) и эволюции, но в сочетании с важными элементами самоорганизации.

Система и среда. Самоорганизующиеся системы необходимо рассматривать в единстве их внутренней структуры и внешней среды, под воздействием которой они формируются. В эволюционной теории взаимодействие системы со средой изначально считалось важнейшей движущей силой развития, в результате которой система, объект, организм и пр. подстраивались под изменения среды и их реакции могли приводить к качественным изменениям. Очень наглядно это было представлено в теории Ж.-Б. Ламарка, согласно которой «упражнения» животных приводили к изменению их фенотипа, а далее наследовались, но не менее сильно – в теории естественного отбора Ч. Дарвина (именно среда отбирает полезные свойства), а также социального отбора, вытекавшего из теории Г. Спенсера и так называемых социал-дарвинистов. В то же время система, организм стремятся достичь определенной независимости от среды. Каждый

уровень организации жизни противодействует среде, из которой он произошел; в противном случае он не мог бы сохранять свою независимость как отдельная и четко ограниченная структура. От гена до вида и типа все уровни благодаря своей собственной организации в значительной степени избегают воздействия среды. Для этого они используют внутренние регуляторные механизмы (Лима-де-Фариа 1991: 358–359). В процессе эволюции противодействие среде возрастало (Там же: 361).

Изучение космической эволюции говорит о том, что эволюционные силы отбора (хотя и с заметно меньшим по степени влияния на «прогресс» эффектом) появляются уже на этой фазе эволюции. Разумеется, эволюционные изменения опосредуются влиянием физических или химических сил, но они налицо. Неудивительно, что дарвиновскую теорию естественного отбора постоянно пытаются использовать для анализа эволюции и процессов в неживой природе (Baker 2014; Wong *et al.* 2023). Хотя, по нашему мнению, здесь требуется не дарвиновский подход, а гораздо более широкий.

Влияние среды на Землю многообразно. В первый период существования Земли и других планет бомбардировка планетезималями и метеоритами оказывала на них очень большое влияние (Bottke *et al.* 2012; Gomes *et al.* 2005; Early... 2012; Johnson, Melosh 2012; Workshop... 2012; Гринин 2017: 121–122; Grinin 2018). Внеземные факторы были определяющими в процессе зарождения Земли, образования первой гадейской континентальной коры и начала архейской эры (Глуховский, Кузьмин 2015; Кузьмин, Ярмолюк 2011). Радиация и прочие влияния существенно ограничивали развитие жизни. Однако появление первичной атмосферной оболочки намного снизило внешние воздействия. Появление магнитосферы также значительно способствовало защите жизни от радиации (см. ниже). В целом взаимоотношение со средой сильно, в ряде отношений доминирующе влияет на системогенез. Фундаментальная причина системогенеза при соприкосновении тел заключается в появлении в пограничной зоне градиентов, а значит, и сил, приводящих к перемещению субстанции, циркуляции, дивергенции и конвергенции, торможению потоков, турбулентности, волнению, концентрации организмов и многим другим эффектам, способствующим порождению всякого рода вещественных неоднородностей, а вместе с ними и геосистем (Ретеюм 1988).

Роль оболочек. Говоря о Земле как о единой системе и о ее подсистемах, мы будем постоянно иметь в виду оболочки. Наличие оболочек – важнейший способ отделения системы от внешней среды (Гринин 2017: 50, 94). Эта идея является иллюстрацией правил формообразующего влияния среды на организм и правила роста устойчивости и приспособляемости систем (см.: Гринин и др. 2008). Водная оболочка и круговорот воды существенно влияют на смягчение климата. Ионосфера вместе с магнито-

сферой защищает от радиации (Buis 2021; Voosen 2022; Планета... 2024). Твердая кора защищает поверхность и другие оболочки от катастрофического влияния внутреннего тепла Земли. Таким образом, развитие оболочек ведет к усложнению системы, ее самосохранению и саморегуляции. Однако, конечно, роль оболочки может зависеть от ее свойств. Слишком плотная атмосфера Венеры препятствует теплообмену этой планеты с космосом, что создает на ней резко повышенную температуру.

Земля имеет сложное оболочечное строение. Геосферы обладают известной автономностью (Пушаровский Д. Ю., Пушаровский Ю. М. 1998). В результате оболочки способствуют защите планет (и Земли особенно) от чрезмерного влияния внешней среды (условно это можно называть изоляцией). В результате оболочки позволяют сложной самоорганизующейся и саморегулируемой системе в известной мере автономизироваться и самоизолироваться в том числе с помощью собственных временных и иных ритмов. Это позволяет объекту приобретать и сохранять свою индивидуальность и таксономическую определенность. Этим в определенной мере объясняется и антиэнтропийная направленность геолого-географических процессов (Круть 1978: 80). Различие в сейсмических характеристиках земных оболочек (геосфер), отражающих различие в их физических свойствах и минеральном составе, создает возможности для моделирования геодинамических процессов в каждой из них в отдельности.

Автоэволюции, считает А. Лима-де-Фариа, присущ некий антидететический элемент, проявляющийся в том, что интеграции противостоит автономия. На каждом уровне эволюции, от элементарных частиц до сообществ, образуются специфические единицы, но в то же время автономия приводит к независимости составляющих эти единицы компонентов. Автономия проявляется на атомном уровне в форме радиоактивности, на клеточном уровне – в форме злокачественного роста, а в сообществах, например, – в виде революций, которыми руководят индивидуумы (Лима-де-Фариа 1991: 347)⁵. Это интересная мысль, и если ее развить, то мы увидим, что антитезы, или пары взаимодействия (порядок – антипорядок; организация – энтропия; объединение – разъединение/распад; стабильность – изменение), действительно прослеживаются на всем протяжении эволюции. На Земле это превосходно видно в процессе образования и распада суперконтинентов, раскрытия и закрытия океанов и т. п. При этом получившие автономию подсистемы могут ее не сохранять. Так, в гадейский период Земля обрела свою первичную кору, но затем она была расплавлена (Nebel *et al.* 2014; Глуховский, Кузьмин 2015; Кузьмин и др. 2018; 2021a; 2021b).

⁵ Мы бы сказали, что точнее говорить не о революциях, а о борьбе за самоопределение, автономию, за независимость и т. п. Речь может идти только о такого рода, то есть национальных или национально-освободительных, но не социальных, революциях.

Таким образом, важные характеристики сложных систем – автономность, самосохранение, саморегулирование, другие экзогенные процессы, а также способность отвечать на вызовы эндогенных влияний – тесно связаны с наличием, изменением и особенностями их оболочек. В разных областях и направлениях эволюции постоянно идет поиск таких защитных оболочек. В частности, в химической эволюции также шел поиск таких оболочек, пока не появились мембраны, которые позволили создать фазово обособленные системы органических веществ, отделенных от внешней среды.

Фрактальность (делимость, подобие) геологических тел может рассматриваться от кристаллов до залежей полезных ископаемых, в принципе они являются фундаментальной особенностью не только Земли, но и других планет и даже Вселенной (Харченко, Лапта 2021). Фрактальность поверхностных рельефов активно изучается в геологии, но она является интересным свойством и Земли как системы в целом. Она может быть подчинена определенной закономерности. Обнаружение ядрышка внутри внутреннего ядра (см. ниже), вероятно, также может быть отнесено к фрактальности, хотя, конечно, различия определяются многими вещами, в том числе различия наблюдаются на уровне анизотропии железоникелевого сплава и кристаллов железа, слагающего обе зоны внутреннего ядра (см. также: Andrews 2021).

Два вида эволюции. Отметим еще, что эволюцию можно делить по типу на аддитивную (добавочную), когда новое сосуществует со старым (таково, например, сосуществование старых и молодых галактик), и замещающую, когда новое вытесняет старое (так новые победоносные государства заменяют побежденные старые). Обычно имеет место сочетание той и другой формы, но какая-то преобладает. Что касается Земли, то для нее как для единичного объекта более характерна замещающая эволюция, особенно для внутренних структур. Но и на поверхности Земли, скажем, молодые океаны вытесняют старые. Однако на поверхности Земли старые структуры (например, Уральские горы) вполне сосуществуют с молодыми (Кавказ). Тем не менее и при замещающей эволюции на любом уровне даже через миллиарды лет следы бывшего остаются в каких-то проявлениях (это очень наглядно видно, например, в геноме). В геологической эволюции благодаря новым научным методам удастся восстанавливать процессы, от которых практически ничего не осталось. Так, гадейские цирконы донесли до нас определенные сведения о характере геологических процессов, протекавших в то время, в частности благодаря им и изучению следов изотопов кислорода в них удалось составить представления о гадейской первичной земной коре и ее уничтожении (Nebel *et al.* 2014; Кузьмин и др. 2018).

3. Структура Земли

Структура. Наиболее крупные структурные части Земли: внутреннее и внешнее ядра, мантия, кора. Границы между геосферами нечеткие, они проникают друг в друга, тем более что внутри этих геосфер могут быть крупные горизонтальные и вертикальные разломы. Границы геосфер и зон внутри последних определяются путем фиксации изменения скорости (обычно скачкообразное изменение) сейсмических волн⁶. Выделяется целый ряд таких границ (о них см. ниже). Очень интересно, что и сами границы имеют некоторые переходные области (Короновский 2002). Это вполне характерно для различных сфер Универсума и эволюции, пограничные зоны – очень часто сложные, неоднородные, подвижные элементы, что обеспечивает и переходность между различными частями, процессами, средами и т. п., и возможность трансформаций. Отсюда неудивительно, что границы этих геосфер могут варьировать, с течением времени они нередко меняют свое положение в зависимости от проходящего через отдельные их части размера теплового потока из глубины Земли.

Структуру Земли можно представить и по-другому, в частности объединив ее в три еще более крупные таксонометрические единицы: первая – тектоносфера (земная кора и верхняя мантия – литосфера плюс астеносфера); вторая – мезосфера (нижняя мантия); третья – ядро (Miyuama *et al.* 2007; Хаин 2003). Подробнее об этом см. в конце статьи.

Таким образом, хотя структурное деление, конечно, зависит в первую очередь от особенностей структуры, но в немалой степени и от научного аспекта. Поэтому могут быть разные описания структур. Это вообще характерно для научных методов систематизации (см.: Гринин 2006; Grinin, Korotayev 2025).

Земная кора. Земная кора неоднородна. Она включает верхний (осадочный) слой, а также нижнюю кору. Иногда выделяют также среднюю кору. Эти слои отличаются своим минеральным составом. Верхний осадочный слой состоит из продуктов разрушения коренных пород (в частности, горных или перенесенных водными потоками, а также биологического происхождения и т. д.). Он может превышать по толщине 10 км в областях длительного прогибания земной коры (соответственно, там накапливаются толщи осадков) и отсутствовать в областях поднятий. Согласно теории, затем следует гранитный, или гранито-метаморфический, слой и нижний базальтовый⁷. По всей поверхности планеты присут-

⁶ Выделяют продольные (первичные) Р-волны и поперечные (вторичные) S-волны.

⁷ Гранит и базальт – две натуральные горные породы, имеющие внешнее сходство и близкие по значению характеристики. Помимо основных характеристик, цвета и происхождения разница между гранитом и базальтом заключается также в геологических особенностях месторождений минералов. Базальт – основная (щелочная) порода, богатая железом, магнием и кальцием. Гранит содержит значительное количество кремнезема (оксида кремния), что делает его более кислым по составу. Гранит также богат калием и алюминием. Содержит

ствует лишь самый нижний – базальтовый слой; гранитный практически отсутствует в океанах, то есть на большей части поверхности Земли. Таким образом, гранит формирует породы материков, а базальт образуется на дне мирового океана. Дело в том, что при движении литосферных плит происходит плавление минералов. Тяжелый базальт опускается на дно, а материковые массивы гранита выходят на поверхность⁸. Считается также, что ранняя архейская кора стала частью базальтового слоя современной земной коры, разумеется, с сильно метаморфизованными в глубинных условиях породами (Wedepohl 1995; Rudnick, Fountain 1995; Вовна, Мишкин 2017).

Толщина коры различна в различных частях Земли, для материков она мощнее (от 30 до 70 км; 30–40 км на равнинах континентов, до 50–75 км в горных районах), чем для океанов (от 10–12 км [Парначев 2008])⁹. В земной коре (на поверхности Земли) выделяются подвижные пояса, складчатые вулканогенные пояса, горные пояса, горные складчатые сооружения, океанические плато и глубоководные впадины, континентальные и океанические рифты и мн. др. Кроме того, можно назвать глубинные тектонические структуры, региональные разломы, островные дуги и т. д. Для темы статьи особо стоит отметить, во-первых, срединно-океанические хребты (СОХ), то есть зоны расширения океанического дна, или спрединга, вызванного мантийной конвекцией (подробнее об этом см. ниже). Срединно-океанические хребты являются самым крупным и протяженным (до 70 тыс. км) элементом рельефа дна океана¹⁰. А во-вторых,

также кальций и другие элементы, придающие ему темный цвет. Минеральный состав гранита – полевые шпаты (60–65 %), кварц (до 35 %) и слюды (5–10 %).

⁸ Таким образом, в теории предполагается, что в материковой части коры под осадочным слоем лежит гранитный, а под ним базальтовый. Однако в универсальности этой идеи есть сомнения. Во время бурения сверхглубокой Кольской скважины (ее бурили с перерывами более 20 лет с 1970 по 1994 г.) на практике оказалось следующее. Прогнозируемых на глубине 5–7 км базальтов не нашли, даже когда опустили до 12 км. На месте прогнозируемой по геофизическим данным границы между гранитным и базальтовым слоями земной коры (раздел Конрада) оказалась граница между гранитами и менее прочными и трещиноватыми породами – гнейсами. Иными словами, на данной территории важнейшее положение, что за гранитным слоем коры следует базальтовый, не подтвердилось (Бойко, Прока-тедь 2014: 59; см. также: Grinin 2025c).

⁹ Однако существует многочисленный фактический материал по глубинному сейсмическому зондированию (ГСЗ) и другим сейсмологическим данным о наличии толстой коры под океанами, морями и островными дугами. Так, под Срединно-Атлантическим хребтом на основе длинного годографа преломленных волн установлено существование толстой коры мощностью до 38 км, а в Курило-Камчатской зоне, в области перехода от континента к океану, установлена кора до 40 км (Салихов 2005: 50–51). Это лишний раз показывает, насколько общие модельные свойства Земли, выделяемые геологией как эмпирические обобщения (правильности, закономерности), могут расходиться с реальностью. Таких исключений очень много.

¹⁰ Срединно-океанические хребты не обязательно занимают срединное положение в океаническом бассейне, как, например, Срединно-Атлантический хребет, а могут и по диагонали пересекать океан (таковы Восточно-Тихоокеанский и другие хребты). Их ширина достигает 3000–4000 км, а характерное превышение над дном моря 1–3 км (Парначев 2011: 107).

зоны глубоководных желобов, которые протянулись на тысячи километров вдоль островных дуг и восточного континентального обрамления Тихого океана. Глубоководные желоба указывают на выход на поверхность сейсмофокальных зон, или зон субдукции, то есть зон активных контактов литосферных плит, в результате чего часть материала плит погружается в мантию (подробнее см. ниже). Неудивительно, что в этих зонах сосредоточено большинство глубокофокусных землетрясений.

Земная кора, помимо указанных выше слоев, включает в себя многочисленные оболочки (гидросфера, криосфера, атмосфера, биосфера и др.), которые не имеют четких границ и взаимно проникают друг в друга, и/или связана с ними.

Снизу земная кора маркируется границей, так называемой поверхностью Мохоровичича (Мохо), так как оттуда начинается ускорение сейсмических волн. Очень интересно, что в общих чертах форма поверхности Мохоровичича представляет собой зеркальное отражение рельефа внешней поверхности литосферы: под океанами она ближе к поверхности, под континентальными равнинами – глубже (она расположена на глубине от 5 км под океанами до 70 км под горно-складчатыми поясами).

Общеизвестно, что с каждым километром вглубь Земли температура повышается и так продолжается до самого центра планеты (см. ниже)¹¹. Соответственно энергетические и иные процессы сильно меняются. В частности, основной причиной плавления вещества и возникновения магматических очагов в литосфере является повышение температуры. Но вместе с повышением температуры по мере движения внутрь растет и давление. Давление, напротив, препятствует разжижению, расплавлению вещества. Именно чудовищное давление во внутреннем ядре (от 330 до 360 гигапаскалей, или от 3 300 000 до 3 600 000 атмосфер) делает внутреннее ядро твердым телом.

Мантия Земли занимает место между корой и внешним ядром, то есть от первых десятков километров земной коры до 2900 км глубины. Мантия в основном состоит из твердых, преимущественно силикатных пород, то есть оливина и других минералов, в состав которых входит кремний (Si, силиций). Но в ней много и иных элементов и веществ, а также есть вода, другие жидкости, расплавы (см. ниже). Температура, как уже сказано, повышается с глубиной, поэтому в нижней мантии она близка к точке плавления, а сменяет мантию уже жидкое внешнее ядро.

Литосфера – это верхняя твердая часть мантии. Но иногда литосферу выделяют как отдельную оболочку. Вообще структурно она определяется по-разному, поскольку в нее включают земную кору и в то же время относят к верхней мантии. Таким образом, земная кора вместе с ча-

¹¹ В вышеуказанной Кольской сверхглубокой скважине на пятикилометровой глубине окружающая температура превысила 70 °С, на семикилометровой – 120 °С, а на глубине 12 км датчики зафиксировали 212 °С (Бойко, Прокатень 2014: 59).

стью верхней мантии до астеносферного слоя и называется литосферой (каменной оболочкой; но не во всех работах ее выделяют особо). Толщина литосферы на континентах и под океанами различается и составляет вместе с земной корой в среднем соответственно под континентами 25–200 км и под океанами 5–100 км. Наиболее тонкая кора – под срединно-океаническими хребтами. Наибольшая – в ряде мест наиболее древних платформ (по некоторым данным, даже до 300–400 км [Габдуллин 2005: 205]). Но вообще данные о мощности слоев как коры, так и литосферы могут заметно различаться в разных работах.

Астеносфера. Между литосферой и оставшейся частью верхней мантии (или, в других представлениях, средней мантии) расположен промежуточный слой – астеносфера (мощностью от 50 до 200 км), которую часто рассматривают как часть литосферы, а вместе их относят к верхней мантии, нижняя граница которой местами доходит до 410 км. Астеносфера обладает пониженной плотностью и некоторой вязкостью, что позволяет ей, хотя и очень медленно, но двигаться («течь»). В геологически длинные сроки это способствует движению литосферы, точнее говоря, литосферных плит, что приводит к движению, столкновению, другим контактам между плитами (см. ниже) и за миллионы лет изменяет положение материков и форму и количество океанов. Впрочем, можно согласиться с У. Кэри (1991: 238), что в тектоническом масштабе текут все породы. Это показывает относительность каких-то свойств, если рассматривать их в соответствующих пространственных и временных масштабах. Так, в астрономическом масштабе времени совершенно, казалось бы, неизменные объекты имеют свою историю и цепочку изменений. И даже неизменная темная материя, вероятно, все же изменяется, только для этого может потребоваться время – большее, чем, как считают, существует нынешняя Вселенная. Но, разумеется, все-таки астеносфера и другие промежуточные слои обладают существенно большей текучестью, чем, скажем, литосфера.

Важно понимать, что в современных геотектонических представлениях астеносферному слою отводится роль своеобразной смазки, по которой могут перемещаться вышележащие слои мантии и коры. Смазка выступает как необходимый элемент (посредник) в определенных процессах, который непосредственно в них не участвует (то есть не трансформируется в результате процесса), но без которого эти процессы невозможны или крайне затруднены. Вообще такие промежуточные элементы (посредники) очень распространены, в частности можно вспомнить о катализаторах в химических реакциях. Особенности астеносферы объясняются возможным ее плавлением в пределах 1–2 %, что обеспечивает понижение вязкости и увеличение электропроводности. Плавление проявляется в виде очень тонкой пленки, обволакивающей кристаллы при температуре порядка +1200 °C (Короновский 2002: 42).

Но важно понимать, что в астеносфере, хотя она и не жидкая, а лишь размягченная, часто возникают расплавы и образуется магма, которая может выходить наружу в результате извержений вулканов.

Мантия Земли (от 10 до 2900 км) состоит из пород ультраосновного состава. Химически она образована магнием (Mg, 12,7 %), железом (Fe, 34,6 %), кремнием (Si, 15,2 %) и кислородом (O, 29,5 %), а минералогически от половины и более – оливином $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ (Габдуллин и др. 2012: 203). Мантия подразделяется на верхнюю (до глубины около 410 км), среднюю, или переходную (до глубины около 670 км), и нижнюю (до 2900 км)¹². Таким образом, литосфера (твердый слой) и астеносфера (слой пониженной вязкости) фактически и составляют верхнюю мантию (см. выше). В мантии имеют место: плюмы; структуры, обладающие повышенной плавучестью за счет более низкой плотности, которые выдавливаются наверх (апвеллинги; диапиры), зоны конвергенции и дивергенции (зоны коллизий, субдукции, спрединга); сейсмофокальные зоны, глубинные тектонические структуры (разломы), пустоты и др. О некоторых из них мы будем говорить ниже.

Внешнее ядро начинается с глубины 2900 км (граница Гутенберга) от поверхности Земли и сложено в основном (так же как и внутреннее ядро) железом и никелем, но с добавлением кремния, серы, кислорода (возможно и других элементов, например водорода) и с участием флюидов (то есть жидких и газообразных легкоподвижных компонентов магмы). На границе мантии и ядра меняются физическое состояние вещества с твердого (мантия) на жидкое (внешнее ядро) и химический состав с силикатного на металлический.

Фазовое состояние вещества внешнего ядра – жидкое (по геофизическим данным), что определяет его важнейшее свойство: под влиянием осевого вращения Земли оно, наподобие динамо-машины, генерирует главное магнитное поле планеты (Хаин 2003), но это происходит благодаря взаимодействию жидкого внешнего и твердого внутреннего ядер. Это поле обладает интересной способностью периодически менять северный и южный полюс местами. Эти периодические инверсии запечатлены в горных породах в виде линейных магнитных аномалий, что позволяет получать дополнительные сведения об истории развития Земли с помощью так называемого магнитостратиграфического метода в геологии. Механизм таких инверсий не получил пока однозначного объяснения.

Если бы магнитное поле у Земли не появилось (примерно 3,5 млрд л. н.), то зарождающаяся на нашей планете жизнь (тогда существовавшая

¹² На глубине 670 км ввиду возрастания давления происходит смена структур кристаллических решеток оливина. Здесь мантия делится на верхнюю и нижнюю. Однако, по мнению некоторых геологов, основывающихся на современных сейсмотомографических данных и данных глубинной геодинамики, такого деления недостаточно, они предлагают выделение по крайней мере шести сфер (Пушаровский Д. Ю., Пушаровский Ю. М. 1998). И это только показывает, что всякая систематизация имеет уязвимости и ограничения.

лишь в океане в виде бактерий и простейших) подверглась бы гораздо большей дозе солнечной радиации, особенно в результате вспышек на Солнце (Buis 2021), в результате чего развитие жизни могло бы пойти другим, менее продуктивным путем. Все это показывает, во-первых, мощнейшую взаимосвязанность различных структур Земли, во-вторых, роль счастливых (и соответственно несчастливых) случайностей в эволюции.

Внутреннее ядро считается твердой геосферой шарообразной формы, состоящей полностью или в основном из железоникелевого компонента¹³. По размерам оно сопоставимо с размером Плутона (который ранее считался планетой). Внутреннее ядро сформировалось позже внешнего за счет стекания чистого железа и никеля. Оно вращается с иной скоростью, чем внешнее ядро и вся планета (см., например: Овчинников, Краснощеков 2021; Voosen 2022), что имеет особое значение. За счет разницы в скорости создается трение между внутренним и внешним ядром, что ведет к нагреванию внешнего ядра и не дает ему остывать (Хаин, Короновский 2007: 17). Укажем, что и трения на границе внешнего ядра и мантии также могут являться одним из источников внутреннего тепла Земли (Летников 2001).

В целом мы очень мало знаем об этой геосфере. Не так давно сообщалось, что удалось обнаружить наличие твердых, мягких и жидких структур в верхних 240 км внутреннего ядра (Новейшее... 2021)¹⁴. Также недавно во внутреннем ядре, как считают, обнаружено еще меньшее ядро, или ядрышко (Nogady 2023). Это твердый металлический шар радиусом около 650 км (это не более 1 % общего объема Земли, но процент по массе, конечно, выше). Такие открытия в любом случае вносят существенные коррективы в представления о том, как устроена планета. Появление системы двух ядер и взаимодействие внешнего и внутреннего ядра сильно увеличило сложность системы Земля. Внутреннее ядро на протяжении всей истории Земли и даже в настоящее время медленно, но непрерывно растет за счет внешнего (Овчинников, Усольцева 2021; см. также: Хаин, Короновский 2007: 17).

Отсюда делается вывод, что два главных процесса определяют динамику земного ядра и формирующие за счет этого структурные особенности: конвекцию (тепловую и композиционную) во внешнем ядре и рост внутреннего ядра (Овчинников, Краснощеков 2021).

Стоит также указать на два особых свойства внутреннего ядра. Это анизотропия (то есть неодинаковость свойств в зависимости от используемого для анализа направления внутри ядра, что проявляется в разнице в скорости прохождения сейсмических волн) и отличная от остального

¹³ Некоторые считают, что во внутреннем ядре помимо железоникелевых сплавов должны присутствовать и более легкие элементы, такие как кремний и сера, а возможно, кремний и кислород (Бойко, Прокатень 2014: 38).

¹⁴ Есть также гипотеза, что кристаллы железа, которое преобладает во внутреннем ядре, организованы иначе, чем во внешней оболочке внутреннего ядра (Andrews 2021).

тела планеты скорость вращения (Andrews 2021). Понятно, что движения внутреннего ядра Земли могут оказывать влияние на тектонические процессы и иметь геодинамические следствия.

Структура указанных геосфер пока изучена совершенно недостаточно, но уже ясно, что она очень сложная. В частности, имеется переходный слой между внутренним и внешним ядром.

В целом плотность внутренних частей Земли возрастает с погружением от 2700–2800 кг/м³ на поверхности до 12 500–14 000 кг/м³ во внутреннем ядре (но данные о внутреннем ядре являются предположительными), средняя плотность Земли – 5510 кг/м³. Особенно сильный скачок плотности – от 5500 кг/м³ в низах мантии до 10 000–11 500 кг/м³ во внешнем ядре – совпадает с границей Гутенберга (на глубине 2900 км), при этом, напомним, внешнее ядро обладает свойствами жидкости.

Промежуточные слои. Чем сложнее структура, тем больше в ней пограничных и промежуточных слоев и тем важнее их роль для отделения частей (в данном случае геосфер), а также как каналов для прямой и обратной связи. Для понимания структуры Земли важно представлять промежуточные слои между геосферами или частями геосфер. Промежуточные слои, как и вообще структурные части Земли, устанавливаются по различиям в скорости прохождения сейсмических волн в них. Астеносфера, вероятно, наиболее известный промежуточный слой. Но таких слоев несколько, по сути, каждая подструктура имеет промежуточные слои. Так имеется переходный слой между верхней и нижней мантией, которую часто обозначают как среднюю мантию, природа которой остро дискуссионна (Салихов 2005: 48; Пушаровский 2001)¹⁵. Таким образом, само понимание промежуточности меняется в зависимости от точки отсчета. Кроме того, деление на структуры может производиться по сейсмографическим данным (скорости волн) или по свойствам вещества к деформациям (реологические свойства): твердые, жидкие, со множеством вариаций по плотности и другим качествам¹⁶. Есть также дублирующие обозначения слоев.

Итак, выделяется несколько промежуточных слоев в мантии, в том числе астеносфера и слой D'', которые обладают пониженной вязкостью. Слой D'' располагается между нижней мантией и внешним ядром примерно между 2700 км и 2900 км, но он неровный, имеет мощность 150–350 км (Кузьмин, Ярмолюк 2011). Таким образом, можно заключить, что данный

¹⁵ Это связано и с общим взглядом на роль мантии в геодинамике. До относительно недавнего времени вся оболочка, заключенная между ядром и верхней мантией, рассматривалась как тектонически инертная среда, тогда как она сама способна создавать тектонические импульсы (Пушаровский 2001).

¹⁶ В частности, внутри Земли устанавливаются три главные, глобальные сейсмические границы, разделяющие земную кору и мантию (граница М), мантию и внешнее ядро (граница Гутенберга), внешнее и внутреннее ядра. Скорость, соответственно, зависит от плотности и состава вещества.

слой отражает неравномерное и разноинтенсивное поступление энергии ядра в область мантии (Пушаровский Д. Ю., Пушаровский Ю. М. 1998).

Пониженная вязкость делает возможными медленные конвективные перемещения мантийного вещества, что подтверждается так называемой сейсмической томографией, позволяющей «увидеть» очень незначительные плотностные неоднородности в мантии.

4. Геодинамика

Под динамикой Земли (геодинамикой) обычно понимают прежде всего механику глобальных процессов в Земле. Однако она, в свою очередь, связана с тепловыми (а), физико-химическими (б) и электромагнитными (в) явлениями. Различают динамику Земли как планеты в целом и динамику каких-либо ее сфер или частей. В геодинамике выделяют три группы процессов: общепланетарные (так, явно планетарное выражение имеют пояса: сейсмические, вулканические и т. д.); межранговые (между геосферами), затрагивающие несколько сфер; локальные, присущие только одной сфере и ее части (Злобин 2014). Тектонические движения – основное проявление динамики планеты. Движения земной коры происходят в результате напряжений, они вызывают деформацию слоев Земли. Таким образом, геодинамика определяет взаимодействие частей с помощью ведущих природных сил. В частности, внутренняя динамика твердой Земли определяется конвекцией (то есть перемещением за счет разницы температур), которая происходит на разных уровнях и охватывает разный объем (Хаин, Короновский 2007: 34). Об этом см. ниже.

Конвекция может быть не только в мантии (верхней, средней и нижней), но и в ядре (внешнем). Такие структуры, как сейсмофокальные зоны, или зоны субдукции, проявляются в сфере верхней и, возможно, средней мантии и земной коре, разломы – в земной коре и верхней мантии и т. д. Таким образом, ряд процессов происходит не в какой-то одной сфере, а в нескольких из них, что связано как с отсутствием четкой границы между ними, так и с недискретностью физических свойств (Злобин и др. 2008).

Геотектоника – это часть геодинамики. Последняя нацелена на изучение структур, движения, деформации и развитие в тектоносфере и в Земле в целом. Тектоникой охвачена вся мантия, то есть и в средней, и в нижней мантии также имеются тектонические структуры, течения и движения (Кулиев 2008).

Стоит добавить еще, что относительно поверхности Земли тектонические движения могут быть вертикальными или горизонтальными. И они также влияют как на верхние, так и на нижние сферы. Вертикальные глубинные разломы занимают важное место среди основных структурных элементов в геологии (Там же). Это тем более существенно, что, согласно ряду исследований, в строении литосферы, средней и нижней мантии существуют механически ослабленные (сдвиговые) зоны. Таким образом,

поскольку внутренняя структура Земли не является однородной (так же как и структура любых геосфер), тектонические и иные динамические движения оказывают сильное и не всегда предсказуемое воздействие. Неоднородность структуры – это общая возможность в эволюции для трансформаций и изменений. Сейсмотомография дала очень много для выявления неоднородностей в строении не только мантии Земли, но даже ее внутреннего ядра. В частности, обнаружены реологические различия между двумя половинами внутреннего ядра, которые истолковываются как результат неравномерной кристаллизации его внешней части за счет подошвы внешнего ядра (Хаин 2010: 756).

Разломов в земных структурах насчитывается очень много. Прежде всего в литосфере, особенно в ее верхней части, в связи с тем, что литосфера неоднородна в горизонтальном направлении. Однако для темы статьи интересны крупные разломы вертикального типа. Сверхглубинные разломы достигают 700 км (Злобин 2014). Естественно, что такие разломы могут оказывать влияние на разные части геосфер и разные геосферы. Вертикальные разломы в принципе расположены перпендикулярно друг другу на экваториальных и меридиональных плоскостях; существуют в структуре сложно-композиционной среды Земли (Кулиев 2008) и сами усложняют эту структуру. Горизонтальные разломы тоже играют существенную роль. Также, по некоторым предположениям, на горизонтальных поверхностях на различных глубинах Земли могут возникать латеральные разломы, соответствующие сферически концентрическим характеристическим поверхностям (Там же).

Структура внутренних слоев Земли может представлять в ином аспекте, если рассматривать ее с точки зрения геотектоники. Так, литосферу и астеносферу нередко объединяют в понятие «тектосфера», или просто «тектосфера», так как эти оболочки в тесном взаимодействии составляют основную сферу тектонических и магматических процессов, находящих свое отражение на земной поверхности. Хотя и в переходном слое мантии (то есть в средней мантии) еще могут быть источники очагов землетрясений, однако уже глубже 700 км в мантии таких очагов не зафиксировано (Короновский 2018).

5. Общее представление о взаимодействии геосфер

Системность. Наша планета представляет собой открытую, неравновесную, самоорганизующуюся сложную систему и в пределе охватывает всю Землю. Система Земли как система (Anderson 2002), подсистемами которой являются структурные части и геосферы. Взаимное воздействие геосфер носит сложный характер и характеризуется нелинейными откликами, где малые изменения в одной геосфере могут вызывать каскадные эффекты в других.

Нелинейность вообще характерна для сложных систем, и чем сложнее система, тем заметнее эта нелинейность может проявиться, особенно в неустойчивом бифуркационном состоянии. Считают, что извержения вулканов могли стать причинами некоторых массовых вымираний (см., например: Кузьмин и др. 2018), в частности великого пермского вымирания (252 млн л. н.), когда исчезло около 90 % видов животных, обитавших в океане, и 70 % наземных позвоночных. В целом было уничтожено 90 % существовавшего тогда биоразнообразия (Benton 2003). По некоторым предположениям, его причиной послужили массовые извержения вулканов на территории Сибири – сибирские траппы (Ярмолук, Кузьмин 2021). Извержение вулкана Тоба на острове Суматра примерно 74 тыс. лет назад вызвало десятилетнюю «вулканическую» зиму, а также новый ледниковый период. Считают, что данное событие сильно сократило популяцию древних людей, хотя не все с этим согласны. Нелинейность очень характерна для обществ, где в период кризисов или предкризисных состояний событие, которое в другое время не являлось бы серьезным фактором, может стать триггером глубокого кризиса. Так происходит в периоды финансово-экономических кризисов (подробнее см.: Гринин, Коротаев 2017), в частности дефолт финансовой компании Lehman Brothers стал триггером кризиса 2008 г. В период революций общество находится в неустойчивом состоянии, так что различные причины, включая и роль личности, имеют огромное значение не только для исхода революций, но и для облика послереволюционного общества (Grinin 2010; 2022; Гринин 2011).

Таким образом, нелинейность, в том числе в плане соотношения причин и следствий (когда относительно малые причины вызывают большие последствия), характерна для системы Земля. Но, конечно, пока процессы, идущие глубоко в нашей планете, не будут достаточно ясны, многие изменения, в том числе в литосфере и коре, будут оставаться непонятыми или не полностью понятыми. Тем не менее, несмотря на то что внутренние сферы и оболочки изучены совершенно недостаточно, уже есть немало фактов и обоснованных гипотез относительно функционирования Земли как системы, в том числе в отношении обмена веществом, энергией, взаимного динамического, энергетического и иного влияния, а также влияния изменений в разных оболочках на другие оболочки.

При этом важно отметить, что подгонка и необходимая для нее трансформация различных сфер Земли заняла очень длительное время, причем она продолжается по сию пору и будет продолжаться. В частности, выяснилась очень интересная деталь. А. В. Хофманн (Hofmann 1997) показал, что изотопные характеристики базальтов, которые поднимаются наверх из мантии, несут информацию о составе и эволюции мантийных резервуаров на протяжении миллиардов лет. То есть подобно тому как свет от очень далеких звезд идет к нам миллиарды лет и мы видим его только сейчас, а звезд, которые его излучали, уже может вообще не существовать, так

и базальты, остатки которых поднимаются из глубин, уже давно не существуют. Однако их удастся обнаружить и составить представление об очень древних геологических процессах. Таким образом, плюмовый магматизм, о котором ниже будет идти речь, представляет собой один из каналов передачи информации из глубоких геосфер к поверхности. Существуют, конечно, и другие вещественно-информационные каналы. Так, погружение внутрь мантии (субдукция) океанической коры создает обратный вещественно-информационный поток, транспортирующий поверхностные сигналы (включая биогенные компоненты) в глубокие геосферы (см., например: Plank, Langmuir 1998). Информационная составляющая обмена веществ и энергии – важнейшая часть процессов.

Новые открытия, подобные обнаружению ядрышка во внутреннем земном ядре, сильно изменяют наши представления об эволюции Земли, открывая ворота в прошлое планеты (Стрекопытов 2023). Не менее интересный факт – открытие крупных водных резервуаров в мантии. В частности, благодаря изучению изотопов водорода был выяснено, что глубокий водный мантийный резервуар присутствовал в недрах Земли по крайней мере с палеоархейской эры (3,6–3,2 млрд л. н.). И это указывает, что рециклинг литосферы, измененной морской водой, в глубокую мантию, предположительно путем субдукции, начался до 3,3 млрд л. н. (Sobolev *et al.* 2019).

Итак, геосферы активно взаимодействуют между собой в результате различных факторов. И это взаимодействие, как и в любой крупной и сложной системе, весьма разнообразно. Очень хорошо изучены взаимодействия в рамках пограничных зон поверхности Земли (атмосферы, гидросферы, твердой оболочки, биосферы и пр., в частности климата [Lenton *et al.* 2008]). Но в настоящей работе нас интересуют в основном эндогенные факторы глубинных процессов Земли, обеспечивающих системность на планетарном уровне.

Это взаимодействие проявляется в различных формах и масштабах, но в целом свидетельствует о единстве системы Земля. Таким образом, мы можем сказать, что все оболочки так или иначе взаимодействуют, как и должно быть в системе. Кроме того, тут действуют различной длительности циклы и колебания, которые в преобразованном виде проявляются и в оболочке или близких к поверхности слоях (см. ниже).

Прямое и обратное воздействие. Обычное представление о взаимодействии различных геосфер заключается в том, что нижние слои за счет происходящих в них мощных тепловых потоков воздействуют на верхние, прежде всего на кору путем извержений вулканов, магматических потоков, землетрясений, глобальных подвижек коры, разломов и пр., изменяя тем самым рельеф земной поверхности. Влияние магнитосферы, образующейся за счет вращения жидкого внешнего ядра вокруг твердого внут-

ренного, также общеизвестно¹⁷. Появление концепции тектоники плит добавило к этому взгляду о доминирующем влиянии внутренних процессов на верхние сферы понимание того, как движение плит в океане и под материками приводит к крупным изменениям физической карты, в результате чего материки и океаны меняют свои очертания, местоположения, в прошлом то формируя суперконтиненты, то разламывая их. Процесс постепенного усложнения земной коры за счет формирования новых и преобразования возникших форм в результате изучен для многих периодов в деталях. В целом мы все больше узнаем о том, как внутренние процессы Земли влияют на процессы в более верхних геосферах, в частности как химическая составляющая конвекции и обмен веществом в больших глубинах Земли ведут в конечном счете к изменениям на ее поверхности.

Появляется все больше свидетельств того, что влияние внутреннего ядра Земли по отношению к внешнему ядру и другим оболочкам сказывается на процессах, происходящих даже на уровне литосферы, в частности на сейсмичности последней (Левин 2001; Левин, Сасорова 2009; Хаин 2010) и на тектонику плит. В частности, описывается следующий механизм. Дифференциальное вращение ядра является естественным следствием конвективных течений в нем. Более легкие жидкие частицы в поле силы тяжести всплывают вверх по радиусу, а более тяжелые, наоборот, погружаются вниз. Подвижные частицы сохраняют свой момент количества движения относительно оси вращения. Поэтому легкие частицы всплывают и замедляются по отношению к слоям жидкости, куда они попадают, а более тяжелые опускаются и двигаются быстрее. В результате наружные слои внешнего ядра испытывают замедление, которое мы наблюдаем как западный дрейф, а внутренние слои ядра ускоряются, что наблюдается как восточный дрейф. Так возникает дифференциальное вращение земного ядра¹⁸.

Можно считать, что есть какие-то механизмы, которые делают влияние внутренних процессов на поверхность непостоянным, причем сила их влияния заметно, но разнонаправленно меняется во времени. Наглядно это проявляется, например, в силе и частоте землетрясений. Впрочем, отметим, что сила процессов или каких-то кризисных проявлений в разных областях и сферах Вселенной не так часто проявляет себя с четкой периодичностью и одной и той же силой. Вспышки на Солнце, глубина вымираний в биосфере, сила экономических кризисов и многое-многое другое очень сильно варьируются. Конечно, какие-то закономерности удастся

¹⁷ Можно упомянуть и о менее известных влияниях, идущих из центра Земли. Так, предполагается, что вышеуказанная реологическая неравномерность между половинками внутреннего ядра находит свое выражение в конвекции, происходящей во внешнем ядре, а также отражается в низах мантии и выше (Aubert *et al.* 2008).

¹⁸ В геологии под западным и восточным дрейфом обычно подразумевают горизонтальные перемещения литосферных плит в направлении запад – восток или восток – запад, являющиеся результатом движений земной коры. Это ключевой аспект теории тектоники плит, описывающей структуру и динамику земной коры.

обнаружить – так, были вычислены циклы солнечной активности. Что касается закономерностей в изменении интенсивности проявления эндогенных процессов на поверхности Земли, то до настоящего времени они полностью не раскрыты. Возможно, неравномерность связана с тем, что, прежде чем всплыть, легкий (или более нагретый) материал должен накопиться в глубине (на дне) в большом масштабе, крупными массами, а на это требуется время. Возможно, здесь когда-нибудь удастся обнаружить периодичность (Бойко, Прокатень 2014: 125).

Добавим, что необходимость накопления, конечно, обычная часть процессов, особенно таких, где количество переходит в качество. Нерегулярность или неодинаковость проявления каких-то процессов – в целом характернейшее явление в Универсуме и эволюции. Практически нет процессов, которые были бы во времени совершенно одинаковыми. У живых организмов это проявляется совершенно четко в связи с их жизненным циклом, в обществе также постоянно колеблются те или иные параметры, иногда резко выходя за обычные границы. Нет никаких оснований думать, что внутриземные процессы могут быть стабильными. Однако понять причины такой нестабильности и ее возможную ритмичность – значит сделать огромный шаг в понимании системы Земля.

Исследование влияний из глубин Земли на ее поверхность исключительно важно. Но нужно понимать и противоположное влияние, без чего представление о системности будет ограниченным. В последние десятилетия появляется все больше фактов и гипотез о мощном обратном влиянии более высоких слоев на более глубинные, о комплексном взаимодействии геосфер с прямыми и обратными связями. Возьмем землетрясения. На первый взгляд кажется, что они влияют в основном на поверхностные слои, тогда как глубоко внутри Земли (в нижней мантии и ядрах) спокойно, подобно тому как в глубине моря волнение на его поверхности не чувствуется. Однако выясняется, что после сильного землетрясения Земля содрогается, словно колокол, причем это длится не просто несколько часов, а несколько дней (Nogrady 2023). Мощные землетрясения способны даже сместить земную ось. Так, землетрясение в Японии в 2011 г., по разным подсчетам, сместило ось вращения на 10–15 см; землетрясение в Чили сдвинуло ось на 8 см, а аналогичное происшествие в Индийском океане, случившееся в 2004 г., – на 6 см (Японское... 2011).

Таким образом, несомненно, что явления, происходящие в верхних оболочках, находят отражение в нижних – от коры к ядру и наоборот (Злобин 2014). Так, рассматривая процессы от поверхности Земли к ее центру, можно сказать, что, согласно тектонике плит, погружающаяся (субдуцирующая) плита влияет на верхнюю и нижнюю мантию вплоть до границы мантии и ядра. Это воздействует на конвекцию во внешнем, жидком ядре, вызывает в нем возбуждения, которые достигают внутреннего ядра. В свою очередь они дают импульс возникновению на границе

ядра и мантии суперплюма. Вследствие чего разогретый материал суперплюма растекается по обе стороны от границы мезосферы и тектоносферы. Это вызывает конвекцию в последней и движение литосферных плит.

Таким образом, чем больше мы узнаем о нашей планете, тем в более сложном виде предстает система Земля. Впрочем, это общее явление: чем глубже мы понимаем процессы, тем больше осознаем и их сложность.

6. Основные силы, энергетические источники, потоки и типы взаимодействия вещества и геосфер

Основные силы, влияющие на систему Земля. Существует целый ряд процессов, которые осуществляют взаимодействие между различными геосферами. Это взаимодействие включает в себя: а) обмен веществ; б) обмен энергией; в) морфологические изменения; г) иные изменения, в том числе связанные с физическими и химическими характеристиками вещества. В свое время мы подчеркивали, что для самоорганизации не требуется большое количество «организаторов», то есть сил или правил, достаточно их ограниченного числа (Гринин 2017: 171). Это вполне касается и основных сил, которые определяют геодинамику и энергетический обмен Земли. Это сила тяжести, которая продолжает процесс дифференциации, хотя он и идет сегодня не слишком активно¹⁹. Напомним, что все геосферы являются результатом дифференциации вещественного состава первичной Земли. При этом и сегодня наблюдается медленный рост ядра за счет мантии (Хаин 2010), а внутреннего ядра – за счет внешнего (см. выше).

Это конвекция, то есть перемещение масс жидкости или газа вследствие разницы температур и плотности²⁰. В частности (но это только один из многих примеров), в общем виде наиболее вероятной причиной движения литосферных плит является тепловая конвекция в мантии Земли (Хаин 2003), то есть конвективные течения в мантии, вызываемые ее разогревом.

Можно считать, что и в целом основными движущими силами динамики твердой Земли являются внутреннее тепло и гравитация. Тепловые гравитационные силы обуславливают всплывание разогретого вещества из самых низов мантии до земной поверхности и погружение охлажденного на поверхности Земли поступившего ранее из глубоких недр вещества обратно в мантию вплоть до самых ее низов – слоя D" (Он же 2010). Согласимся с А. Ю. Ретеюмом (1988), что способность отдельных веще-

¹⁹ Некоторые геологи, например У. Кэри (1991), В. В. Белоусов (1976), считают, что сила тяжести определяет в главном и процесс горообразования (орогенез) за счет выталкивания менее плотных пород на поверхность. Благодаря силе тяжести, пишет Кэри (1991: 298), все участки литосферы стремятся к состоянию равновесия за счет плавучести, причем области с меньшей плотностью (континентальные) поднимаются выше.

²⁰ Конвекция обусловлена действием архимедовой силы.

ственно-энергетических начал упорядочивать вокруг себя среду может рассматриваться как закон.

Для космической эволюции, включая и планетную, гравитация является важнейшей силой. Из всех фундаментальных сил она одна обладает дальним действием, достаточным для преодоления космических расстояний. Однако отметим, что для космической эволюции в целом гравитация исключительно важна своим дальним действием. Однако для отдельных космических объектов, поскольку их место в галактиках и звездных системах уже определено, наибольшее значение гравитации в эволюции и жизненном цикле имеет место, во-первых, в процессе образования звезд из газопылевых облаков, когда огромное облако именно под влиянием силы тяжести начинает процесс самоорганизации. Оно трансформируется сначала в намного более плотное образование, а затем, в результате разогрева, – в новую звезду (Сурдин 2001; Суркова 2005). То же можно сказать и о процессе формирования планет из протопланетного диска, то есть в процессе аккреции (Гринин 2017; Grinin 2018). Во-вторых, это влияние на форму, поддержание формы объекта, поэтому шарообразная форма столь распространена (энергетически она наиболее выгодна²¹). Выгорание водорода и затем других веществ в звездах, как известно, ведет к изменению формы звезды именно за счет гравитации (на определенной стадии – выгорания водорода – многие звезды раздуваются в красных гигантах, а на стадии полного выгорания топлива коллапсируют в белых карликах)²². Для Земли, как и для других планет, поддержание формы за счет гравитации также очень важно. В том числе и для взаимодействия с Луной. Однако для планет и особенно Земли гравитация начинает играть особую роль в процессе дифференциации вещества, которая не столь значима для звезд. Именно дифференциация, как мы говорили выше, играет важную роль в самоорганизации планет и, как мы видели, ключевую – в эволюции Земли. Тут стоит отметить, что для дифференциации важнейшее значение имеет разнообразие атомного и вещественного состава, заметное в процентном отношении. В звездах температура превращает вещество в плазму. Но в любом случае в них абсолютно доминируют водород и гелий. В газовых гигантских планетах также налицо преобладание водорода и гелия, поэтому дифференциация там не играет столь важной роли, как у силикатных планет земного типа.

²¹ Большая масса звезд и планет вызывает сильное гравитационное притяжение, которое действует одинаково по всем направлениям, образуя наиболее энергетически экономичную форму – сферу. Сферическая форма минимизирует поверхностную энергию объекта и создает условия для более устойчивого существования в космосе.

²² Структура звезды при этом сильно меняется. Одновременно со сжатием ядра внешние оболочки звезды расширяются, звезда разбухает, увеличиваясь в радиусе в сотни раз, и превращается в красного гиганта. Белый карлик – крошечное, но очень массивное ядро, потерявшее оболочки, в котором высокое давление вырожденного электронного газа, обусловленное квантовыми, а не тепловыми движениями электронов, эффективно противодействует огромным силам гравитационного сжатия (см.: Черепашук, Чернин 2004: 132).

В отношении биологических организмов гравитация как бы задает параметры, в которые должны вписаться организмы и их эволюция; это влияет на формирование отдельных ветвей биологической эволюции, в частности летающих ящеров, насекомых, птиц. Однако в целом в биологической эволюции преобладают другие силы и механизмы. Таким образом, гравитация играет разные роли в процессе эволюции.

Давление. С гравитацией связана и такая сила, как давление, поскольку его показатели зависят не только от вышележащих масс, но и от ускорения силы тяжести по мере увеличения глубины. Вещество Земли с глубиной испытывает все большее воздействие давления вышележащих толщ горных пород и в связи с этим все более уплотняется. С учетом плотности Земли и изменения ускорения силы тяжести были сделаны подсчеты давления на различных глубинах. По В. А. Магницкому, на глубине 1 км давление равно 275 атм; у подошвы земной коры на глубине 50 км – около 13 000 атм. На границе мантии и ядра (2900 км) давление составляет около 1,3–1,4 млн атм, а в центре Земли, как уже сказано, от 3,3 до 3,6 3 млн атм. На больших глубинах с возрастанием давления существенно изменяется и строение вещества Земли. Как мы говорили выше, давление – важнейшая причина того, что внутреннее ядро твердое. В газовых гигантах Юпитере и Сатурне внутреннее ядро образовано из водорода, который в результате большого давления стал металлическим (Ксанфомалити 1997; 2012). Некоторые геологи высказывают предположение, что и внутри земного ядра есть металлизированный водород. В любом случае огромное давление внутри Земли влияет на структуры минералов и веществ.

Конвекция. Стоит отметить, что именно в планетах конвекция играет особо значимую роль, при этом ее роль в эволюции и саморегулировании Земли заметно выше не только чем у остывших планет, но, в целом, и чем у планет с горячими недрами. Не стоит забывать, что конвекция играет огромную роль в регулировании гидросферы и атмосферы. Столь же значимую роль конвекция играет и в верхних слоях газовых гигантов, а также Венеры с ее мощной атмосферой²³; впрочем, и на Марсе, несмотря на разреженную атмосферу, конвекция в ней сильная (о конвекции на планетах см. подробнее: Grinin 2025a; см. также: Гринин 2025 в настоящем выпуске).

В рамках земной системы конвекция проявляется на самых разных глубинах благодаря тому, что есть разные по плотности и консистенции слои. В частности, из-за того, что три промежуточных слоя в мантии обладают пониженной вязкостью (см. выше), они обладают и определенной текучестью, в результате чего медленно движутся и совершают важную работу. Кроме того, имеются разные по плотности структуры и массы в самих геосферах (благодаря чему их с помощью сейсмоволн и идентифи-

²³ Есть мнение, что на Венере сильна и конвекция в коре (Solomatov, Jain 2025; Павлов 2025).

цируют), разломы, неоднородности, пустоты и мн. др. Имеется также жидкое внешнее ядро. В итоге конвективные движения ощущаются на разных глубинах и на поверхности Земли. В целом схематично получается, что нижние к горячему ядру слои мантии нагреваются быстрее, чем верхние, в результате более горячее и менее плотное вещество мантии движется вверх, а более холодное из более высоких слоев начинает опускаться вниз. Все это в конечном счете стимулирует процессы общемантийной конвекции. И такое перемешивание идет постоянно, но, разумеется, скорости этой конвекции относительно небольшие. Тем не менее за геологические сроки огромная часть вещества мантии (и не только) перемешивается.

Важно отметить, что, согласно теории общемантийной конвекции, движения вещества охватывают едиными конвективными ячейками всю мантию – от ее границы с ядром до подошвы литосферы. На свойствах тепловой конвекции в мантии основываются практически все современные концепции и парадигмы глобальной тектоники (тектоники плит, плюм-тектоники, горячих точек, горячих полей и др.).

Конвекция проявляется в самых разных явлениях и формах. В частности, японские исследователи выяснили, что в слое D", который обладает повышенной мягкостью, на границе жидкого ядра и твердой мантии (примерно 2700–3000 км) именно такая текучесть упорядочивает кристаллы минерала постперовскита. В результате, когда все кристаллы направлены одинаково, волны ускоряются так, как наблюдается в слое D". Благодаря тому, что твердая порода мантии на этой глубине медленно течет, создавая горизонтальные потоки, происходит выравнивание кристаллов, что и приводит к ускорению сейсмических волн. Иными словами, именно внутренние потоки твердой мантии формируют сейсмическое поведение Земли, которое мы наблюдаем (Левченко 2025).

Виды конвекционных процессов и обмен веществом. Как уже сказано выше, Земля представляет собой самоорганизующуюся систему, развитие которой сопряжено с постоянным взаимодействием ее внутренних оболочек. Это взаимодействие весьма наглядно проявляется в процессах разномасштабной конвекции (Кузьмин, Ярмолюк 2011). Одним из самых известных видов проявления конвекции и типов взаимодействия разных геосфер является подъем горячего вещества из больших глубин, причем это постоянно восходящие потоки. Это так называемые плюмы, идущие из глубины в тысячи километров (подробнее о них ниже). Есть и обратные потоки (см. ниже). Другой вид взаимодействия описан выше – это взаимодействие внешнего жидкого ядра (диаметром 3 тыс. км) и нижней мантии через слой D". Разница в температуре и плотности оказывает здесь решающее влияние. Дело в том, что температуры в ядре значительно превышают температуры мантии. Слой D", находящийся в непосредственном соприкосновении с внешним ядром, испытывает его влияние, а поскольку, как уже сказано, его плотность меньше, чем у нижней мантии, местами

данный слой порождает огромные, направленные к поверхности Земли сквозьмантийные тепломассопотоки, называемые плюмами. Они могут проявляться на планете в виде крупных вулканических областей, как, например, на Гавайских островах, в Исландии и других регионах (Пушаровский Д. Ю., Пушаровский Ю. М. 1998).

Выделяют третий род конвекции, который проявляется во внешнем ядре Земли (то есть на глубине тысяч километров), находящемся в жидком состоянии. Эта конвекция проявляется прежде всего в виде подвижного магнитного поля, подверженного периодическим инверсиям (Olson *et al.* 2011; Пучков 2016).

Теперь скажем немного об обмене веществом. Как мы уже говорили, для понимания системности Земли и роли ее оболочек важно, что это не одностороннее движение. В результате двусторонних процессов происходит обмен вещественными компонентами, которые обеспечивают химическую составляющую конвекции, что в конечном итоге проявляется в процессах, идущих в литосфере и на поверхности Земли (Maquyama *et al.* 2007; Buffett, Seagle 2010; Пучков 2016).

В частности, восходящим, разогретым и насыщенным флюидами потокам противостоят нисходящие, холодные, которые представляют собой материал литосферных слэбов (то есть погружение в глубины мантии Земли вплоть до границы с ядром частей «холодных» литосферных плит в процессе субдукции; см. ниже). Мало того, что есть обратное движение. Предполагается (Maquyama *et al.* 2007), что в ряде случаев этот материал в сильно преобразованном виде достигает основания нижней мантии и накапливается на границе ядра и мантии, окружая и ограничивая более горячие участки – супервеллы (крупные зоны низких скоростей поперечных волн, или LLSVP), которые являются источниками и плюмов, и суперплюмов. **Таким образом, обмен веществом происходит до очень больших глубин** (Пучков 2016: 89).

Энергетические источники. Системный характер взаимодействия геосфер, как сказано, в огромной степени определяется тепловыми движениями и изменениями; менее важные – это электромагнитные силы, в том числе связанные с солнцем. Большинство процессов под поверхностью определяется внутренними земными тепловыми процессами, включая теплообмен между мантией и более горячим внешним ядром (Пучков 2016). Но в основе динамики Земли лежит заключенный в ней запас тепловой энергии, в основном унаследованный во время аккреции Земли вследствие соударения образовавших ее планетезималей (возможно, осталась и некоторая часть энергии, полученной Землей в результате так называемой поздней метеоритной бомбардировки в конце 5-го – начале 4-го млрд л. н.). Иными словами, Земля по-прежнему расходует энергию, запасенную миллиарды лет назад. Тут кстати отметить, что запасание, аккумуляция энергии для последующего разворачивания жизненного цикла – важнейший паттерн в дочеловеческой эволюции, проявляющийся по-

всеместно (не говоря о звездах и планетах, в биологии это зерно, яйцо и т. п., что позволяет появляться потомству, а также многое другое). А человечество в последние столетия активно использует ископаемое топливо, запасенное в коре Земли в виде каменного угля в результате процессов неполной утилизации биомассы в каменноугольный период (345–280 млн л. н.), а также нефти и газа, происхождение которых дискуссионно.

Роль энергии, получаемой в результате дифференциации вещества, ранее была очень важна, но сегодня незначительна. Достаточно важным, но не основным источником внутренней тепловой энергии планеты является естественная радиоактивность многих из слагающих ее элементов – урана, тория, рубидия, стронция. Наконец, стоит упомянуть и источник энергии, связанный с гравитационным влиянием Луны и Солнца, порождающим приливы не только в океане, но и в литосфере, диссипация которых также сопровождается переходом механической энергии в тепловую. Роль всех этих источников тепловой энергии с течением геологического времени снижается. Еще одним возможным источником внутреннего тепла является трение на границах смежных оболочек, вращающихся с разной скоростью (Летников 2001). Таким образом, баланс между внешними и внутренними источниками энергии изменялся в течение геологической истории в пользу внешнего источника (Хаин 2010).

Роль неоднородностей. Для того чтобы происходили различные процессы, объект не должен быть однородным. Напротив, чем больше неоднородностей, тем активнее идут процессы. Земная кора состоит из неоднородностей. Но неоднородности, сходные с поверхностным рельефом, оказывается, есть и внутри Земли. Это неожиданно, но с точки зрения системности и эволюции вполне объяснимо. Неоднородность, как мы уже не раз говорили, очень важна с эволюционной точки зрения (она обеспечивает разнообразие и «разность потенциалов»). Неоднородности похожего типа, согласно последним исследованиям, могут иметь место и в других подсистемах Земли. Неоднородности очень хорошо проявляются на поверхности нашей планеты. Как мы говорили выше, пустоты, разломы, различия в плотности, раздвиги и многое другое имеют место и в мантии. Не исключено, что на поверхности даже внутреннего ядра возникают высокие «горы» и глубокие «каньоны». Так что динамично меняющийся рельеф может быть и у самой глубинной границы между земными оболочками, в частности граница мантии и внешнего ядра отнюдь не гомогенна, а гетерогенна (Kim *et al.* 2020; Стрекопытов 2020).

7. Плюмы

Когда мы говорили о конвекционных потоках из глубины Земли, то упоминали плюмы. Плюмы – это мощные вертикальные потоки горячего вещества, идущие из мантии. Сегодня считают, что они (многие из них) начинаются в вышеуказанном слое D" на границе внешнего ядра и ниж-

ней мантии (2700–3000 км)²⁴. Предполагается, что температура породы, из которой сложены плюмы, примерно на 200 °С выше температуры остальных пород мантии (Tsekhmistrenko *et al.* 2021; Andrews 2021). А поскольку мантийные плюмы сильно разогреты, они за счет конвекции оказываются способными относительно быстро подниматься к верхним слоям. По некоторым данным, они поднимаются в 10 раз быстрее скорости движения других геологических структур мантии, включая движение плит. При этом в процессе перемещения они практически не отклоняются. Но хотя плюмы более быстрые в сравнении с другими структурами, надо понимать, что в любом случае скорости у них геологические, то есть небольшие. Поэтому, хотя, согласно данным сейсмотомографии, распределение восходящих и нисходящих ветвей конвективных ячеек в верхней мантии в общем соответствует схеме литосферных плит Земли, однако надо иметь в виду, что с глубиной этот план более соответствует распределению границ плит, имевшему место в прошлом, возможно, восходящему к началу распада Пангеи, то есть 180 млн л. н. (Злобин 2014). Подобно тому как свет доходит до нас с огромным временным разрывом, и результаты тепловых (и иных) процессов, которые происходили в ядре Земли десятки или даже сотни миллионов лет назад, только сейчас проявляются на ее верхних слоях и поверхности (см. ниже).

Плюмовые конвекционные потоки являются постоянными потоками, которые могут существовать довольно долго. Продолжительность жизни плюмов может быть очень большой, даже превышать 100 млн лет. Тихоокеанский суперплюм имеет возраст более 120 млн лет, он зародился в эпоху раннего мела (Хаин, Короновский 2007: 33). Только подумать, какое чудовищное количество энергии и вещества перенесли эти вертикальные гольфстримы за 100 млн лет в верхние слои литосферы! Прекрасный пример постоянного паттерна в нашем Универсуме: накопление энергии в чудовищные сгустки, а затем рассеивание их в течение миллионов и миллиардов лет. Вечная антитеза аккумуляции и диссипации/энтропии, благодаря которой идет множество процессов.

Эти сквозьмантийные восходящие потоки могут быть различного объема и интенсивности: от отдельных плюмов длительного действия типа гавайского до мощнейших короткоживущих потоков вроде суперплюмов сибирского типа, приводящих к образованию гигантских трапповых полей²⁵. Словом, мантийные плюмы могут сильно отличаться друг от дру-

²⁴ Это является предметом дискуссий, поскольку наличие плюмов по данным сейсмотомографии подтвердилось лишь в отношении менее десятка их и остается пока не доказанным даже для таких классических плюмов, как Исландия, Гавайи и Йеллоустон (Злобин 2014).

²⁵ Траппы, трапповый магматизм – особый тип континентального магматизма, для которого характерен огромный объем излияния базальта за геологически короткое время на больших территориях. Выше уже упоминались трапповые излияния в Сибири в пермский период палеозоя.

га, обладая большим своеобразием и специфичностью, что затрудняет выработку общей теории (плюм-тектоники). Пока остается проблематичным вопрос о том, что именно определяет число плюмов на поверхности Земли и все ли они достигают ее поверхности.

Мантийные плюмы никто в реальности не видел. Они проявляют себя особенностями прохождения сейсмических волн, а также горячими точками и полями.

Выделяют от 37 до 117 горячих точек (Хаин 2003). Они представлены в самых разных местах, но в основном находятся в Атлантике и Индийском океане близ осей срединно-океанических хребтов, включая районы тройных сочленений, и вдоль трансформных разломов. В юго-западной части Тихого океана с горячими точками связаны, вероятно, вулканические цепи вдоль крупных разломов, не относящихся к разряду трансформных. Есть горячие точки и на континентах.

Очень крупные плюмы нередко называют суперплюмами. Поскольку нижняя мантия суперплюмов характеризуется повышенной температурой, а в сейсмических полях они выделяется областями пониженных скоростей распространения волн, это позволяет обозначать их также в виде крупнейших низкоскоростных мантийных провинций (Злобин 2014). Когда о плюмах стали активно говорить в геологии, под этим термином понимались «перья» глубинных потоков горячего вещества. Отсюда и название «плюм» (англ. *plume*), означающее «перо, струйка, завиток». Однако сегодняя представления о форме плюмов изменились. Считают, что плюм более похож на гриб.

Суперплюмы выделяются в основном в двух секторах Земли: Тихоокеанском и Африканском. В 2012 г. группа геофизиков и сейсмологов приступила к выяснению очертаний мантийного плюма, развернув гигантскую сеть сейсмометров на огромных глубинах морского дна Индийского океана. Выяснилось, что гигантский мантийный плюм – это не просто магматическая столбообразная структура, она напоминает «дерево», от которого по диагонали расходятся перегретые ветвистые структуры. По мере приближения этих ветвей к земной коре из них, вероятно, вырастают более мелкие, вертикально поднимающиеся ответвления – сверхгорячие мантийные плюмы, над которыми на поверхности Земли расположены хорошо известные горячие точки, в которых наблюдается продолжительная вулканическая активность (Tsekhmistrenko *et al.* 2021).

Исследователи представили следующую картину зарождения и суперплюма под Африкой, согласно которой гигантская каплеобразная структура, находящаяся на глубине 2900 км под поверхностью Африканского континента, как бы вырастает из средней части исследуемого региона, образуя «ствол», и добирается до глубины 1500 км. Представляется, что от верхушки этого ствола расплавленная порода расплзается в виде ветвей, которые идут по диагонали вверх до глубин от 1000 до 800 км; затем из

верхушек этих ветвей, в свою очередь, вырастают тонкие ветви, вертикально поднимающиеся вверх.

Таким образом земное ядро разогревает африканскую каплеобразную структуру, включая ее ствол и вершину. Затем от каждого из мантийных концов отделяется 800-километровая капля; обе капли перемещаются в вертикальном направлении, на это уходят десятки миллионов лет. И в конце концов они достигают границы между плотной нижней мантией и менее плотной верхней мантией (эта граница расположена на глубине примерно 670 км), там они расходятся в стороны. Из их вершин вырастают несколько «хвостов», которые опять поднимаются вертикально, образуя вытянутые башнеобразные структуры, которые и называются плюмами (*Ibid.*; Andrews 2021).

8. Тектоника плит

Системность планеты Земля в настоящий момент предстает перед геологами, разумеется, далеко не в полном виде, поскольку структура, функции, обмен веществ и многое другое у геосфер выявлены не полностью, во многих случаях фрагментарно, многие теории, по сути, являются еще гипотезами или частичными гипотезами. В ряду современных теорий более системно выглядит концепция тектоники литосферных плит. Она представляет собой описание циклического механизма круговорота вещества на уровне литосферы, астеносферы и верхней мантии, по некоторым предположениям, доходящего и до внешнего ядра. Это в теории исключительно интересный механизм прямого (снизу вверх) и обратного (сверху вниз) движения вещества под действием конвекционных сил, когда более нагретые и менее плотные слои поднимаются (всплывают) вверх, а более холодные и плотные опускаются вниз.

Естественно, что такое движение сильно влияет и на поверхность Земли, и на ее внутренние сферы. Правда (и об этом мы скажем ниже), существуют значительные сомнения в отношении верности и универсальности второй части этого круговорота – опускания литосферных плит (их частей), называемого субдукцией. Напомним также, что, в отличие от вулканизма и магматизма, а также плюмов (которые, возможно, существовали на ранних стадиях в некоторых планетах), тектоника литосферных плит признается уникальным земным механизмом. Когда и почему он появился, как трансформировался, – все это и многое другое, связанное с плитами, остается одной из главных проблем геологии (см., например: Добрецов, Туркина 2015).

Как известно, литосфера разбита на некоторое число жестких блоков – литосферных плит. Число этих плит в настоящий момент в исследованиях различных ученых и школ разнится. В связи с таким разнообразием иногда плиты делят по размерам: крупные, или основные, то есть более 20 млн кв. км (их 7–8); второстепенные – от 1 млн до 20 млн (их примерно 15);

и микроплиты менее 1 млн кв. км (их несколько десятков). В целом их количество может составить до 70 или более плит (кроме того, есть предположение, что и крупные плиты не являются гомогенными, а состоят из микроплит²⁶). Естественно, как это всегда бывает с объектами любого типа и на любом уровне эволюции, по размерам, мощности (толщине), времени образования и некоторым важным свойствам литосферные плиты сильно различаются между собой. Толщина любой плиты неодинакова, ее устойчивость в отношении землетрясений и извержений, разломов и прочих тектонических изменений также неодинакова в разных ее частях. Толщина литосферных плит различна для океанической коры (от 3 до 15 км; от 6–18 км в районе рифтовых зон океанов и до 80–90 км вблизи континентальных окраин) и для континентальной (от 30 до 200 км). Стыки литосферных плит являются местами, которые оказывают наибольшее влияние на кору и ее поверхность, поскольку именно на стыках происходят различные столкновения и метаморфозы (см. ниже), которые показывают проявление внутренних процессов на поверхности земной коры.

Исторически изменения формы и взаимного расположения литосферных плит определяющим образом влияли на формирование и раскол суперконтинентов, число и форму океанов, хотя глубинные причины таких изменений остаются во многом неясными (иногда их связывают с суперплюмами)²⁷. Как бы то ни было, тектоника плит во многом определяет поведение литосферы и коры, как континентальной, так и океанической (последней в большей степени), представляя собой особые циклы круговорота вещества и энергии Земли.

Если говорить очень кратко, то процесс литосферной тектоники плит связан с наращиванием коры в одних частях плит и ее исчезновением в других. Очень схематично это выглядит так. Горячее вещество из мантии поднимается в океанах обычно в так называемых срединно-океанических хребтах и как бы раздвигает плиту (которая под океаном гораздо тоньше, чем под материком). В итоге плита расширяется. Этот процесс называется спредингом. Расширяющаяся океаническая плита в результате сталкивается с более толстой материковой и как бы подныривает под нее в астеносферу, где и расплавляется. Этот процесс называется субдукцией. Движение плит осуществляется благодаря особенностям астеносферы, которая

²⁶ Идея абсолютной жесткости и монолитности литосферных плит справедливо оспаривается (Хаин, Короновский 2005: 310; Злобин 2014), поскольку в действительности они разбиты на множество блоков с очень сложным спектром автономных перемещений (Парначев 2011: 35).

²⁷ Неудивительно, что вокруг скорости и особенностей такого движения много споров, которые носят фундаментальный характер (в том числе между сторонниками так называемых фиксизма и мобилизма). Такие фундаментальные споры характерны и для других наук, включая астрофизику, биологию, историю, при восприятии любых изменений, которые имеют крупный или универсальный характер, типа красного смещения галактик, скорости антропогенеза или перемещений народов.

имеет вязкую субстанцию. По ней литосферные плиты скользят весьма медленно, и тем не менее постепенно они меняют свое местоположение. Еще раз повторим, что происходит своего рода обмен веществ между литосферой и астеносферой, а через последнюю – и с мантией.

Движение литосферных плит может быть связано не только с субдукцией, то есть «подныриванием» одной плиты под другую и последующим опусканием ее части в мантию. Это движение может быть и иным. Они могут двигаться поступательно, разворачиваться, сходиться и сталкиваться (конвергенция), расходиться (дивергенция), а также осуществлять сдвиговые перемещения по трансформным разломам, то есть плиты сталкиваются на время, а затем расходятся, при этом высвобождается много энергии, что вызывает сильные землетрясения. Иногда две плиты не расходятся и не пододвигаются друг под друга, а просто трутся краями. В случае столкновения плит меняется рельеф поверхности и образуются (или увеличиваются) горы и возвышенности. Самый известный пример такой границы – разлом Сан-Андреас в Калифорнии длиной 1200 км, где движутся бок о бок Тихоокеанская и Североамериканская плиты.

Таким образом, рождение плит и их уход обратно в мантию происходят в океанах. Зоны спрединга расположены вдоль срединно-океанических хребтов, а зоны субдукции – по границам океанов, они отмечены узкими и глубокими впадинами – глубоководными желобами и островными дугами. Глубоководные желоба и сопряженные с ними краевые валы являются важными морфологическими структурами активных окраин океанов. Они представляют собой узкие протяженные понижения (депрессии) океанического дна, являющиеся самыми глубокими зонами Мирового океана. При столкновении континентов осадочные и вулканогенные отложения этих континентов вовлекаются в крупномасштабные процессы складкообразования, разломообразования, что сопровождается проявлениями высокоградиентного (то есть связанного с резкими изменениями физических параметров) и высокотемпературного метаморфизма (Парначев 2011: 107, 220).

Таким образом, основные положения тектоники плит следующие: 1) литосфера разделена на ряд относительно жестких плит, разграниченных швами, вдоль которых происходят землетрясения и активный вулканизм; 2) смещения плит в океане имеют три вида – раздвиг в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов, субдукцию (погружение), смещение вдоль трансформных разломов; 3) в масштабе Земли непрерывно происходит компенсация растяжения в рифтовых зонах сжатием на периферии океанов, субдукцией океанических плит и деформациями в области островных дуг.

9. Проблемы теории тектоники плит. Новые идеи

Достоинства теории тектоники плит. Подтверждение механизма спрединга. В геологии существовало немало теорий и гипотез, объясняющих тектонические движения в земной коре, мантии и планете в целом, включая такие, как теория расширяющейся (как вариант – пульсирующей) Земли (см., например: Кэри 1991). Некоторые из них и в настоящее время не утратили своего значения и хорошо объясняют ряд явлений (объяснение и перечисление некоторых теорий см.: Владимирская и др. 1985: 400–402; Парначев 2011: 25). Однако наиболее распространенной, объединяющей многие геологические процессы в литосфере и коре Земли, является сегодня концепция тектоники литосферных плит (или плейт-тектоники). Поэтому она принята подавляющим числом геологов и геофизиков мира. Она подтверждается целым рядом измерений и наблюдений, в том числе из космоса²⁸.

В частности, движение плит подтвердили повторные лазерные спутниковые и радиоастрономические наблюдения. Данные глубоководного бурения подтверждают в абсолютном большинстве случаев наличие полосовых магнитных аномалий (то есть изменений магнитного поля Земли в разные периоды); существование трансформных разломов, по которым происходило перемещение движущихся плит, подтверждено сейсмическими и геологическими данными и т. д. (Добрецов и др. 2001; Злобин 2014). Это говорит в пользу гипотезы спрединга, которая способна объяснить большинство из наблюдаемых геологических и геофизических фактов, стала практически общепринятой и может считаться теорией. Тем не менее эта теория объясняет не все факты, в ней просматриваются существенные ограничения и к ней есть претензии. Относительно этих претензий и теории субдукции см. ниже.

Общие ограничения теории тектоники плит. Можно сформулировать ряд ограничений этой теории, которые показывают, что: а) как догму ее принимать нельзя; б) она может рассматриваться как объясняющая теория, но как бы в первом приближении; в) некоторые ее части (прежде всего связанные с субдукцией) вызывают множество вопросов и неувязок.

Во-первых, отмечается эмпиричность и «механистичность» многих положений тектоники плит. Что это значит? Эмпиричность означает, что обобщения не опираются на строгую теорию, а исходят из некоторых наблюдений. Механистичность означает, что теория сильно упрощает

²⁸ Почти все движения плит сейчас подтверждены непосредственными измерениями с использованием методов высокоточной астрономической и спутниковой геодезии. Сейчас измерены их скорости, которые составляют сантиметры и даже миллиметры в год, однако за геологическое время эти расстояния становятся значимыми. Таким образом, твердо установлено, что в результате движения плит лик Земли непрерывно меняется, причем глобально (Савченко, Смагин 2006; 2013).

(аппроксимирует) объекты, в частности представляя океанические плиты простыми, однородными телами, способными к погружению (субдукции). Это можно принять лишь как первоначальное приблизительное обобщение. На самом деле плиты, как уже сказано, сильно различаются между собой размерами, параметрами, формой и т. п. Они и устроены более сложно, их форма отлична от простых тел, а механизм, объясняющий строение переходных зон, может иметь альтернативные решения. Мы бы сказали, что, если исходить из принципов эволюции и системности, в такой глобальной системе круговорота вещества обязательно должны быть ведущие и альтернативные механизмы. Наличие не одного, а нескольких механизмов, альтернативных или доминирующих и латеральных, является не просто обычным в эволюции и даже в сложных системах, но и практически обязательным. Возьмите звезды: длительность их существования, переход на главную последовательность и с главной последовательности, формы их трансформации после выгорания водорода и других веществ и многое другое очень сильно зависит от их массы (см.: Шкловский 1984; Бааде 2001; Гринин 2013). Поведение же десятков очень разных по множеству параметров тектонических плит предполагается одинаковым. В биологическом мире передача генетической информации имеет разные способы в зависимости от уровня развития организмов, в том числе путем горизонтального переноса генетической информации у бактерий (см.: Grinin *et al.* 2026), есть также бесполой путь и некоторые другие. Мы не говорим уже о социальной эволюции, где многолинейность является всеобъемлющей (см.: Grinin, Korotayev 2023).

Так или иначе, но строение плит и областей концентрации сейсмичности, на основе которых первоначально были выделены плиты, оказалось существенно сложнее, чем предполагалось ранее. Да и взаимодействие плит по мере увеличения обнаруженных плит должно представлять все более сложным. Одно дело, когда речь идет о семи крупнейших плитах, другое – когда их насчитывается 70, если включать в это число, помимо основных, латеральные и тем более микроплиты. Естественно, что выделение большого количества плит усложняет кинематику их движения. Как и всегда, классификация при развитии молодой отрасли науки начинает усложняться. Вообще для науки характерно при познании объектов любого типа увеличивать число объектов, древность их происхождения, объемы и т. п. Это характерно для числа галактик и звезд, например размеров Вселенной, размеров Солнечной системы, которая за пару десятков лет «увеличилась» с десятков астрономических единиц до 2 млн. То есть размеры невидимой части более чем в 1000 раз больше видимой! Это характерно для возраста Вселенной, Земли, которые постоянно увеличивались, и т. п. Поэтому не исключено, что и число плит может возрасти, хотя объем Земли известен точно.

Во-вторых, как сказано, есть сильные расхождения между предполагаемой толщиной плит и некоторыми данными. Кроме того, чем старше плита, тем она толще, самые тонкие плиты расположены под молодыми горными хребтами. Но, согласно данным сейсмотомографии, выяснилось, что корни материков сохраняются на большую глубину в мантии, чем предполагаемая толщина плит. А океанические плиты местами прослежены, по данным сейсмотомографии, до глубин 660–1200 км и более, что значительно превышает их предельную мощность – около 100 км (Bijwaard *et al.* 1998; Хаин, Ломизе 2005). Таким образом, получается, что теория плит объясняет явления только в поверхностных слоях, характеризует развитие лишь самой верхней хрупкой оболочки твердой Земли – литосферы (Хаин 2003). В то же время системность охватывает гораздо больший объем.

Соответственно, как это часто бывает, картина постоянно усложняется. Теория, объяснившая много, теперь сама подвергается проверке и нуждается в «подпорке» более крупных теорий (см. ниже).

В-третьих, теория плит, претендуя на глобальность и универсальность, опирается на представление, что движение плит оказывается возможным потому, что под литосферой находится глобальный пластичный слой – астеносфера. Существование астеносферы установлено. Однако 1) геофизические исследования не показывают ее повсеместного наличия на Земле, 2) установлено существование в некоторых районах нескольких подобных слоев. При этом последние обнаружены не только в мантии, но и в земной коре.

Все это означает, бесспорно, наличие более сложных и/или разнообразных механизмов, осуществляющих тектонику литосферных плит; вероятно сосуществование и взаимодействие ведущих и альтернативных (аналоговых) механизмов такого рода. Повторим, эволюция обычно использует не один, а ряд механизмов (в том числе и для перехода к новым уровням), которые и конкурируют, и взаимодействуют, и способны трансформироваться один в другой. Иными словами, эволюция всегда многолинейна, всегда пытается искать путь к новому разными линиями и путями (Гринин 2013; 2017; Бондаренко и др. 2010). Для лучшего понимания можно вспомнить правило платы за прогресс, согласно которому любой эволюционный успех обеспечивается неудачами других попыток подняться на новый уровень, наличием боковых, латеральных или иных линий наряду с главной (см.: Гринин и др. 2008; Гринин 2017; Grinin, Korotayev 2023; LePoire *et al.* 2026). Многолинейность необходимо прикладывать и к важным процессам, поскольку, как уже сказано, обычно они не осуществляются одним-единственным механизмом.

В-четвертых, глубинные сейсмические исследования указывают на тектоническую расслоенность литосферы (это так называемые пластовые срывы, то есть разрывные нарушения в литосфере, при которых наруша-

ется ее сплошность и происходит смещение пластов). Это значит, что структура плит достаточно сложна и теория литосферных плит это недостаточно учитывает.

В-пятых, уязвимые положения тектоники плит касаются их диффузных границ²⁹. Стоит отметить, что проблемы поведения (изменения характеристик) объектов в пограничных зонах всегда исключительно сложны и важны. Пограничные зоны всегда испытывают влияние как внутренних (эндогенных), так и внешних (экзогенных) факторов, то есть самой системы и внешней среды. Так, поверхность земной коры, включающая гидросферу и атмосферу, развивается в результате как диссипации (рассеяния) внутриземной энергии, так и преобразования потока энергии, получаемой от Солнца. Поэтому земная географическая оболочка представляет собой сложнейшую динамическую систему, относительная стабильность которой поддерживается системой обратных связей, обеспечивающих баланс конструктивных и деструктивных процессов (Савченко, Смагин 2013: 16–17).

Существуют и другие не решенные концепцией плит вопросы и противоречия наблюдаемым фактам, которые в том числе связаны с соотношением небольшой толщины литосферных плит и их значительной протяженностью (размерами), а также дальностью перемещения.

Субдукция вызывает наибольшие сомнения. Важнейшим элементом концепции тектоники плит является субдукция (пододвигание и опускание). Но она же, по мнению многих ученых, была и остается до сегодняшнего дня одним из самых спорных вопросов тектоники плит. Поскольку теория литосферных плит не предполагает увеличения размеров Земли, то возникал вопрос, куда же исчезает новообразованное и транспортируемое далее от этой зоны вещество. Как сказано, сторонники теории плит пришли к выводу, что эти океанические плиты вновь погружаются в мантию в зонах субдукции за счет того, что более холодный и тяжелый субстрат океанических плит погружается в более теплое и менее плотное вещество верхней мантии.

Однако процессы в зонах субдукции и особенно механизмы опускания плит вызывают наибольшие дискуссии (Добрецов и др. 2001; Злобин 2014). Иными словами, если сама идея опускания частей океанических плит в целом и принимается, то механизм подныривания, закрепленный в плейт-тектонике, вызывает споры. И это очень важно, поскольку именно такого рода важные детали могут в итоге сделать всю концепцию неустойчивой. Отсюда вывод, что моделирование самого механизма субдукции требует существенной доработки (Хаин 2003). Это связано с тем, что, как

²⁹ Слабовыраженная граница литосферных плит представляет скорее постепенно затухающую широкую полосу, чем линию, а соответственно, при такой конфигурации кинематика может существенно меняться.

считают оппоненты, опускание частей литосферных плит в результате сближений (разного вида, см. выше) литосферных плит в океанах имеет целый ряд механизмов, с помощью которых, собственно, и происходит погружение частей плит в мантию. Так, возможны: затягивание литосферных плит (англ. *pull*) в зоне субдукции вследствие их утяжеления с возрастом, вызванного охлаждением и залечиванием пор новообразованными минералами; «расталкивание» плит (*ridge push*) в зонах спрединга вследствие более высокого положения оси срединного хребта. Также могут иметь место другие виды схождения плит (обдукция³⁰, коллизия, выжимание масс по латерали, послонно-ступенчатое смещение) (см.: Злобин 2014). Это полностью подтверждает высказанную выше идею о том, что не бывает единственного механизма. Альтернативность всегда присутствует, и неучет этого любой теорией приводит к возникновению трудностей. Выявление альтернативных механизмов ведет, как правило, к пониманию большей сложности процессов и нахождению общего на более высоком уровне обобщения.

Таким образом, схема субдукции требует доработки или пересмотра, по крайней мере в плане теории, которая представляет альтернативные механизмы, которые зависят от особенностей плит, местоположения и многих других параметров.

Требуются новые системные подходы более высокого уровня. Многие геологи в течение десятилетий остро ощущали системность геологических процессов Земли, поскольку множество данных свидетельствует о существовании глобального механизма тектогенеза, воздействующего на Землю в целом и контролирующего размещение на земной поверхности структурных элементов и морфоструктур. Эти данные о вертикальном и латеральном размещении разных форм проявления тектонической и магматической активности позволяли им вынести определенное суждение о существовании одновременных глобальных тектонических процессов. Это означало, что размещение и ориентировка структурных форм на поверхности Земли в значительной мере подчиняется общим закономерностям и контролируется глобальными тектоническими процессами (Пейве 1980).

Однако поиск этих закономерностей, тектонических глобальных процессов был очень сложным. Много лет теория геосинклиналей объясняла природу горообразования от опускания (прогиба) земной горы через ее

³⁰ Обдукция – это геологический процесс, при котором более плотная океаническая кора (и даже верхняя мантия) соскабливается с опускающейся океанической плиты на конвергентной границе плит и надвигается на соседнюю плиту. Иными словами, часть вещества опускающейся плиты переходит не в мантию, а на другую плиту. Такой вид взаимодействия обычно происходит при столкновении плит в горных поясах (часть материала из погружающейся океанической плиты попадает на континентальную плиту).

наполнение осадками и затем подъема³¹. В результате последовательной смены различных стадий на месте геосинклинали возникают горноскладчатые сооружения, выраженные в рельефе горными хребтами, разделенными межгорными впадинами. Конечным итогом геосинклинального этапа является формирование континентальной коры с базальтовым, гранитным и осадочным слоями (Подобина, Родыгин 2000). Эта теория хорошо объясняла чередование четырех тектонических этапов (ведущих к образованию складчатости) в фанерозойской истории Земли: каледонский, герцинский, киммерийский и альпийский (см., например: Владимирская и др. 1985). В настоящее время процессы горообразования во многом объясняются результатом схождения литосферных плит, в процессе которого окраины плит сминаются в складки. Впрочем, это никак не отменяет многих процессов, описываемых теорией геосинклиналей, и их повторяющейся цикличности: процессы прогибания морского дна, заполнения прогиба океаническими осадками и подъема геосинклинали из толщи морской воды (соответственно расширения площади суши, регрессии морей, с этим связанной).

Рифтогенез. В 1970–1980-х гг. большое внимание уделялось рифтогенезу как новому научному направлению в геотектонике, как глобальному геотектоническому процессу. Рифтогенезом называют процесс горизонтального растяжения земной коры, приводящий к возникновению в ней или ее верхней части весьма протяженных, удлинённых, четко выраженных впадин. Это тектонические процессы на дивергентных и трансформных границах литосферных плит, ведущие к растяжению и разрыву литосферы. Таким образом, и теория рифтогенеза, и теория плит связаны с процессами на границах литосферных плит и взаимодействия плит³². Не случайно рифтогенез одно время противопоставлялся тектонике плит³³. Рифты представляют собой разломы и надвиги земной коры большой протяженности. В Восточной Африке имеется так называемая Великая рифтовая долина протяженностью почти 5 тыс. км. Ширина долины составляет от 30 до 100 километров, глубина – от нескольких сотен до тысяч метров. Есть мнение, что через 3–4 млн лет по всему разлому Восточная Африка отделится от основной части континента, образуя остров, который двинется к Аравийскому полуострову. Однако очень много рифтовых разло-

³¹ Геосинклиналь – огромный бассейн или впадина, где находятся залежи осадочных отложений и вулканических горных пород тысячеметровой толщины, накопившиеся за время медленной просадки пород в течение долгих геологических периодов. При сейсмических процессах геосинклинали превращаются в горные районы.

³² Кроме того, имеет место активный рифтогенез над мантийным плюмом (например, образование Кенийского и Эфиопского рифтов Восточно-Африканской рифтовой системы); рифтогенез, связанный с коллизией (столкновением) континентов (например, формирование Байкальской рифтовой системы) и др., то есть связанный с глубинными процессами.

³³ См., например, предисловие к (Пушаровский 1985) и в целом эту книгу.

мов обнаружено в океанах и на морском шельфе. Та же Великая рифтовая долина продолжается в Красном море и Аденском заливе. Рифтовые разломы проникают только до подошвы верхних горизонтов коры, то есть зоны максимальных глубин землетрясений на материках. Однако в случае активного рифтогенеза реализуется взаимодействие между астеносферой и литосферой, с термическим утонением литосферы, ее разогревом и поднятием и появлением горизонтальных напряжений растяжения, вызывающих рифтогенез (Парначев 2011).

Тем не менее рифтогенез все же в основном явление, связанное с земной корой. Но системность не может быть определена только по поверхностным (хотя и исключительно важным для людей) явлениям. Она требует идти к внутренним структурам. Теория литосферных плит, которая связала процессы в коре Земли с геодинамикой верхней мантии, на какое-то время объяснила многие явления. Но, как мы видели, много проблем имеется и в ней. Системность требует более глубоких – и в прямом (в плане глубин земли), и в переносном смысле – исследований и выявления связей. Теория, о которой сказано выше, теория мантийных плюмов, зародившаяся одновременно с гипотезой тектоники плит, была новым шагом в этом плане. Однако и она объясняет только часть явлений.

Уже в 1990-е гг. стало ясно, что ограниченность охвата теории литосферных плит и другие ее ограничения требуют включения тектоники плит в систему описания процессов, происходящих в более глубоких оболочках планеты (Miyuama *et al.* 2007), и создания более обширной теории (Салихов 2005: 94). Таким образом, под влиянием новых фактов теория плит усложнилась и обросла противоречиями, поэтому в настоящее время уже не может претендовать на подлинно глобальное, всеобъемлющее значение.

В глобальной геотектонике и геодинамике появилась необходимость разработки всеобъемлющей концепции. Работа шла во многих странах. Одна из таких глобальных концепций геотектоники разработана японскими учеными (*Ibid.*), позволяя представить новую парадигму развития Земли.

Эти ученые предложили теорию тектоносферы, состоящей из трех оболочек/частей. Это верхняя часть – литосфера, в которую входят также земная кора, астеносфера и верхняя мантия. Следующая оболочка – мезосфера. Она включает нижнюю мантию и ядро Земли. Процессы здесь рассматривает плюм-тектоника. В ядре же, по предложению японских исследователей, имеет место так называемая тектоника роста. Таким образом, новая парадигма включает в себя и объединяет тектонику плит, плюм-тектонику и тектонику роста. Рассматривая всю Землю, она может считаться глобальной тектоникой Земли, а тектоника плит является частным случаем этой новой концепции. Есть небезосновательные мнения, что основные свойства глобальной геотектоники связаны с конвекцией.

Для темы настоящей статьи это очень важно, поскольку показывает глобальную системность планеты Земля, теснейшую и многообразную связь между ее оболочками (при определенной автономности оболочек). Это также демонстрирует сложность прямых и обратных связей в Земле, сложные контуры этих связей, что в терминологии кибернетики говорит о сложности системы, ее саморегуляции (о саморегуляции в мегаэволюции см.: Гринин 2016).

Есть идеи о связи плюм-тектоники и плейт-тектоники. Высказано предположение (и построена модель), что периоды, когда вся суша Земли объединялась в единые суперконтиненты – Пангею, Родинию и др., совпадали с активностью в глубинных LLSVP-провинциях (крупные зоны низких скоростей поперечных волн), которые, как сказано выше, являются источниками и плюмов, и суперплюмов. Таким образом ученые связали эволюцию суперплюмов со сборкой и распадом суперконтинентов. Согласно этой модели, массивы LLSVP образуются из литосферных плит, которые, как выяснилось, погружаясь, не растворяются в мантии, как думали раньше, а опускаются до самой границы ядра. Здесь они переплавляются, и гигантские капли разогретого вещества – мантийные плюмы, – отрываясь от LLSVP-провинций, всплывают к поверхности, давая начало новому геодинамическому циклу. Литосфера над плюмами приподнимается, образуя купол, а затем трескается и расходитсся (Gamaleldien *et al.* 2019; Doucet *et al.* 2019; Стрекопытов 2020)³⁴.

Разумеется, на сегодняшний день окончательной, целостной и завершенной концепции или парадигмы нет, и процесс ее создания еще в стадии разработки. Не исключено, что окончательно завершенной концепции и не будет, ибо процесс познания и совершенствования знаний бесконечен (Злобин 2014). Однако нет никакого сомнения, что каждое новое открытие будет в том или ином плане подтверждать системность нашей планеты.

10. Геодинамические системы и геологические циклы

Таким образом, как мы видели, геосферы связаны конвекционными геодинамическими системами разного масштаба, представляющими сложную суперсистему. Разрабатываются концепции иерархичности геосистем. При этом ценность такого подхода связана с объяснением цикличности ряда важнейших процессов, во многом определяющих историческое развитие Земли и позволяющих предсказывать ее будущее.

Эти уровни и их взаимодействие в данном подходе связываются с геологическими циклами разной длительности, масштабности и функциональ-

³⁴ И в целом в режиме обмена веществом предполагается тесная связь между тектоникой плит и деятельностью плюмов (Maquyama *et al.* 2007; Burke *et al.* 2008).

ности. И это придает идее системности Земли особое циклически-историческое измерение.

Ряд исследователей (см., например: Хаин, Короновский 2007; Злобин 2014; см. также: Парначев 2011) рассматривают гипотезу М. А. Гончарова (Гончаров и др. 2005) об иерархии конвективных систем как весьма продуктивную. Согласно этому подходу, в твердой Земле одновременно или последовательно действуют конвективные системы нескольких рангов, образующие определенную иерархию и в целом сложную иерархическую систему. Этот подход углубляет понимание системности, поскольку показывает соподчиненность процессов и подсистем. Наиболее крупные системы связаны с образованием и распадом суперконтинентов в течение истории Земли.

Геодинамическая система нулевого ранга – панглобальная. Она охватывает твердую Землю в целом и связана с ее осевым вращением. Она выражается в сочетании с мантийной конвекцией в западном и северном дрейфе континентов. При этом северный дрейф периодически сменяется южным. Продолжительность таких циклов составляет примерно 800–900 млн лет. Речь идет о том, что суперконтиненты образовывались попеременно то в Северном, то в Южном полушарии (Божко, Баркин 2009). В. Е. Хаин (2010) называет эти циклы циклами Гончарова (Хаин, Гончаров 2006).

Геодинамическая система первого ранга действует в период становления и распада суперконтинентов. Это так называемые циклы Вильсона (Wilson 1966)³⁵. Они делятся, по разным оценкам, от 400 до 800 млн лет, составляя фазы, связанные с увеличением и уменьшением объема суши и соответственно уменьшением или увеличением площади океанов (так называемые геократические и талассократические циклы, связанные также с регрессиями и трансгрессиями океанов и морей, а также с эпохами складчатости, или орогенеза). Геодинамическая система первого ранга охватывает всю мантию, являясь глобальной, и состоит из двух конвективных ячеек (под суперконтинентом и под океаном). К восходящим ветвям «континентальных» и «океанских» конвективных ячеек в новейшее время приурочены соответственно Африканский и Тихоокеанский суперплюмы. Связь суперплюмов с процессами формирования и разрушения суперконтинентов в настоящее время является общепризнанной (Кузьмин, Ярмолюк 2011; Кузьмин и др. 2021; Gamaleldien *et al.* 2019).

Геодинамическая система второго ранга действует лишь в пределах верхней мантии и переходной зоны к нижней мантии, то есть до глубины 410 км. Ей в целом отвечает картина конвекции, описываемой тектоникой плит: восходящие потоки над зонами спрединга и нисходящие в зонах субдукции.

³⁵ Однако есть мнение, что не следует отождествлять понятия «суперконтинентальный цикл» и «цикл Вильсона» (Pastor-Galán *et al.* 2019).

Геодинамические системы третьего ранга имеют ограниченное и латеральное распространение порядка сотен километров, а по вертикали ограничиваются астеносферой и литосферой. Они ответственны за образование активных окраин континентов с их триадой (глубоководный желоб – островная дуга – окраинное море), со своими зонами субдукции и спрединга, а затем образования древних гор (коллизионных орогенов).

Геодинамические системы четвертого ранга приурочены к осадочным чехлам и с ними связано складко-, надвиго-, покровообразование, а также гранитоидный плутонизм и региональный метаморфизм в пределах горных складчатых сооружений.

* * *

Таким образом, формируется величественная и весьма мощная картина связи конвективных подсистем и длительных циклов. Разумеется, это лишь общий набросок, требующий и сложной доработки, и сложной проверки. Тем не менее такой циклически-исторический подход хорошо объясняет рост сложности в процессе саморазвития системы Земля, поскольку каждый цикл не похож на другой, он является не просто повторением, а новым этапом в развитии системы Земля. Так всегда происходит в эволюции. Но если при множестве в целом сходных объектов, каковы, например, звезды, можно говорить о появлении новых типов этих объектов (так, звезды делятся на три поколения), то в развитии одного объекта Земля, так же как и в развитии одного общества, такого рода циклы (периоды) ведут к усложнению соответствующей системы.

Библиография

- Бааде В. 2002. *Эволюция звезд и галактик*. М.: Едиториал УРСС.
- Белоусов В. В. 1976. *Геотектоника*. М.: МГУ.
- Божко Н. А., Баркин Ю. В. 2009. Дисимметрия тектонических процессов в ходе суперконтинентальной цикличности как динамические следствия относительных полярных смещений ядра и мантии Земли. *Материалы 42-го тектонического совещания*: сб., с. 66–70. М.: ГЕОС.
- Бойко С. В., Прокатень Е. В. 2014. *Общая геология*. Красноярск: Изд-во Сибирского федерального ун-та.
- Бондаренко Д. М., Гринин Л. Е., Коротаев А. В. (Ред.) 2010. Социальная эволюция: альтернативы и варианты. *Эволюция: Проблемы и дискуссии* / Ред. Л. Е. Гринин, А. В. Марков, А. В. Коротаев, с. 120–159. М.: Изд-во ЛКИ.
- Виньковецкий Я. А. 1971. *Геология и общая теория эволюции природы*. Л.: Недра.
- Владимирская Е. В., Кагарманов А. Х., Кравцов А. Г., Михайлова Е. Д., Павлов А. М., Пнев В. П., Спасский Н. Я., Чочиа Н. Г. 1985. *Историческая геология с основами палеонтологии*. Л.: Недра.
- Вовна Г. М., Мишкин М. А. 2017. *Ранняя сиалическая кора Земли: ее состав, происхождение и возраст*. М.: Изд-во МГУ.

- Габдуллин Р. Р. 2005. *Историческая геология*: учебник. Кн. 1. М.: Изд-во МГУ.
- Габдуллин Р. Р., Ильин И. В., Иванов А. В. 2012. Геологическая история Земли. *Универсальная и глобальная история: эволюция Вселенной, Земли, жизни и общества*: хрестоматия / Ред. Л. Е. Гринин, И. В. Ильин, А. В. Коротаев, с. 199–215. Волгоград: Учитель.
- Глуховский М. З., Кузьмин М. И. 2015. Внеземные факторы и их роль в тектонической эволюции Земли в раннем докембрии. *Геология и геофизика* 56(7): 1225–1249.
- Гончаров М. А., Талицкий В. Г., Фролова Н. С. 2005. *Введение в тектонофизику*: учеб. пособие. М.: КДУ.
- Гринин А. Л. 2016. Саморегуляция как глобальный тренд мегаэволюции. *Эволюция срезы, правила, прогнозы* / Отв. ред. Л. Е. Гринин, А. В. Коротаев. Волгоград: Учитель.
- Гринин Л. Е. 2006. *Производительные силы и исторический процесс*. М.: КомКнига.
- Гринин Л. Е. 2011. Личность в истории: Современные подходы. *История и современность* 1: 3–40.
- Гринин Л. Е. 2013. *Большая история развития мира: космическая эволюция*. Волгоград: Учитель.
- Гринин Л. Е. 2017. *Большая история развития мира: история и эволюция Солнечной системы*. М.: Моск. ред. изд-ва «Учитель».
- Гринин Л. Е. 2020. *Большая история развития мира: планеты Солнечной системы. Их история и эволюция. Химическая эволюция в космосе и на Земле*. М.: Моск. ред. изд-ва «Учитель».
- Гринин Л. Е. 2024. Химическая эволюция в Большой истории. *Эволюция: Большая история и глобальная эволюция: материалы V Международного симпозиума. Москва, 24–26 октября 2023 г.* / Отв. ред. Л. Е. Гринин, А. В. Коротаев, с. 28–39. Волгоград: Учитель. DOI: 10.30884/978-5-7057-6426-6_03.
- Гринин Л. Е. 2025. Земля как планета. Земля в ряду других планет. *Эволюция: Грани эволюции* / Отв. ред. Л. Е. Гринин, А. В. Коротаев, с. 79–115. Волгоград: Учитель.
- Гринин Л. Е., Коротаев А. В. 2017. *Глобальный кризис в ретроспективе: Краткая история подъемов и кризисов: от Ликурга до Алана Гринспена*. 3-е изд. М.: URSS, ЛЕНАНД.
- Гринин Л. Е., Марков А. В., Коротаев А. В. 2008. *Макроэволюция в живой природе и обществе*. М.: Изд-во ЛКИ.
- Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А. 2001. *Глубинная геодинамика*. 2-е изд., доп. и перераб. Новосибирск: Изд-во СО РАН.
- Добрецов Н. Л., Туркина О. М. 2015. Раннедокембрийская история Земли: роль плейт- и плом-тектоники и космического фактора. *Геология и геофизика* 56(7): 1250–1274.
- Егоров-Тисменко Ю. К. 2005. *Кристаллография и кристаллохимия*: учебник. М.: КДУ.
- Злобин Т. К. 2014. *Геодинамические процессы и природные катастрофы*: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Южно-Сахалинск: СахГУ.

- Злобин Т. К., Левин Б. В., Полец А. Ю. 2008. Первые результаты сопоставления катастрофических Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. ($M = 8,3$) и 13 января 2007 г. ($M = 8,1$) и глубинного строения земной коры Средних Курил. *Доклады АН* 420(1): 111–115.
- Короновский Н. В. 2002. *Общая геология*. М.: МГУ.
- Короновский Н. В. 2018. *Общая геология: учеб. пособие*. М.: КДУ, Добросвет. URL: <https://bookonline.ru/node/798/>.
- Круть И. В. 1978. *Введение в общую теорию Земли: Уровни организации геосистем*. М.: Мысль.
- Ксанфомалити Л. В. 1997. *Парад планет*. М.: Наука.
- Ксанфомалити Л. В. 2012. Юпитер. *Солнечная система* / Ред.-сост. В. Г. Сурдин, гл. 7. М.: Физматлит.
- Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В. 2011. Глубинная геодинамика, или Как работает мантия Земли. *Семь веков российской истории* 42(6). URL: <https://scfh.ru/papers/glubinnaya-geodinamika-geodinamika-ili-kak-rabotaet-mantiya-zemli/>.
- Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В., Гладкочуб Д. П., Горячев Н. А., Деревянко А. П., Диденко А. Н., Донская Т. В., Кравчинский В. А., Оганов А. Р., Писаревский С. А. 2021a. *Геологическая эволюция Земли: от космической пыли до обители человечества*. Новосибирск: Гео.
- Кузьмин М., Ярмолюк В., Горячев Н., Диденко А. 2021б. Эволюция Земли: от зарождения до появления ноосферы. *Природа* 11: 3–16.
- Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В., Котов А. Б. 2018. Ранняя эволюция Земли, начало ее геологической истории: как и когда появились гранитоидные магмы. *Литосфера* 18(5): 653–671. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-5-653-671.
- Кулиев Г. Г. 2008. О внутреннем строении Земли и тектонике в рамках неклассического линеаризованного подхода. *Известия НАНА. Серия Наук о Земле* 1: 18–31.
- Кэри У. 1991. *В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной*. М.: Мир.
- Левин Б. В. 2001. Роль движений внутреннего ядра Земли в тектонических процессах. *Фундаментальные проблемы общей тектоники* / Отв. ред. Ю. М. Пущаровский, с. 444–461. М.: Научный мир.
- Левин Б. В., Сасорова Е. В. 2009. Глубинные распределения землетрясений по широтным поясам в Тихоокеанском регионе: общие тенденции. *Доклады РАН* 426(4): 1–6.
- Левченко С. 2025. Тайна ядра Земли раскрыта: как твердая порода течет на глубине 3000 км под нами. URL: <https://hi-tech.mail.ru/news/128423-tajna-yadra-zemli-raskryta-kak-tverdaya-poroda-techet-na-glubine-3000-km-pod-nami/>.
- Летников Ф. А. 2001. Сверхглубинные флюидные системы Земли и проблема рудогенеза. *Геология рудных месторождений* 4: 291–307.
- Лима-де-Фарна А. 1991. *Эволюция без отбора: Автоэволюция формы и функции*. М.: Мир.
- Мелихов И. В. 2018. *Физико-химическая эволюция твердого вещества*. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний.

- Новейшее исследование:** ядро Земли может оказаться вовсе не твердым (Al Arabiya, ОАЭ). 2021. *ИноСМИ* 15 октября. URL: <https://inosmi.ru/20211015/250708289.html>.
- Овчинников В. М., Краснощеков Д. Н. 2021.** Сейсмические исследования ядра Земли. *Физика Земли* 2: 3–26. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=fizzemli&y=2021&v=0&n=2&a=FizZemli2102008Ovchinnikov>.
- Овчинников В. М., Усольцева О. А. 2021.** О рельефе поверхности внутреннего ядра Земли. *Динамические процессы в геосферах* 13: 73–81. DOI: 10.26006/22228535_2021_1_73.
- Павлов Д. 2025.** Как связано обилие вулканов на Венере и конвекция венерианской коры: гипотеза планетологов. URL: <https://science.mail.ru/news/417-kak-svyazano-obilie-vulkanov-na-venere-i-konvekciya-venerijskoj-kory-gipoteza-planetologov/>.
- Парначев В. П. 2008.** *Основы общей геологии, стратиграфии и исторической геологии*. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та.
- Парначев В. П. 2011.** *Основы геодинамического анализа*: учеб. пособие. Томск: Изд-во НТЛ.
- Пейве А. В. (Ред.) 1980.** *Проблемы глобальной корреляции геологических явлений*. М.: Наука.
- Планета, скрытая в глубинах Земли. 2024.** *ИноСМИ* 11 мая. URL: <https://inosmi.ru/20240511/zemlya-254147782.html>.
- Подобина В. М., Родыгин С. А. 2000.** *Историческая геология*. Томск: ТГУ.
- Пучков В. Н. 2016.** Взаимосвязь плитотектонических и плюмовых процессов. *Геотектоника* 4: 88–104.
- Пушаровский Д. Ю., Пушаровский Ю. М. 1998.** Состав и строение мантии Земли. *Науки о Земле*. URL: <https://pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/668.html>.
- Пушаровский Ю. М. (Отв. ред.) 1985.** *Континентальный и океанский рифтогенез*. М.: Наука.
- Пушаровский Ю. М. 2001.** Тектоника и геодинамика мантии Земли. *Фундаментальные проблемы общей тектоники* / Отв. ред. Ю. М. Пушаровский, с. 10–33. М.: Научный мир.
- Ретеюм А. Ю. 1988.** *Земные миры*. М.: Мысль.
- Савченко В. Н., Смагин В. П. (Ред.) 2006.** *Начала современного естествознания: концепции и принципы*: уч. пособ. Ростов н/Д.: Феникс.
- Савченко В. Н., Смагин В. П. 2013.** *Концепции современного естествознания: в 2 т. Т. 2. Планетное, химическое, биологическое, эволюционное, философия и инструменты, мегаистория Вселенной*. Владивосток: Изд-во ВГУЭС.
- Салихов В. С. 2005.** *Основные проблемы современной геологии*: учеб. пособие. Чита: ЧитГУ.
- Сиротин В. И. 2009.** *Сравнительная планетология (Очерки результатов исследования Земли, Солнечной системы и Космоса)*. Воронеж: ВГУ.
- Стрекопытов В. 2020.** Сплошные неровности. Внутри Земли обнаружили гигантские горы. *РИА Новости* 27 июня. URL: <https://ria.ru/20200627/1573524149.html>.

- Стрекопытов В. 2023.** «Капсула времени». Ученые выяснили, что находится в самом центре Земли. *РИА Новости* 1 марта. URL: <https://ria.ru/20230301/yadro-1854898036.html>.
- Сурдин В. Г. 2001.** *Рождение звезд*. М.: УРСС.
- Суркова Л. П. 2005.** *Звезды и звездные группировки в нашей Галактике*. Чита: ЗабГПУ.
- Хаин В. Е. 2003.** *Основные проблемы современной геологии*. М.: Научный мир.
- Хаин В. Е. 2010.** Об основных принципах построения подлинно глобальной модели динамики Земли. *Геология и геофизика* 51(6): 753–760.
- Хаин В. Е., Гончаров М. А. 2006.** Геодинамические циклы и геодинамические системы разного ранга: их соотношения и эволюция в истории Земли. *Геотектоника* 5: 3–24.
- Хаин В. Е., Короновский Н. В. 2007.** *Планета Земля. От ядра до ионосферы*. М.: КДУ.
- Хаин В. Е., Ломизе М. Г. 2005.** *Геотектоника с основами геодинамики*: учебник. 2-е изд., испр. и доп. М.: КДУ.
- Харченко В. М., Лапта Д. В. 2021.** Фракталы в геологии, геотектонические и геодинамические аспекты. *Наука. Инновации. Технологии* 1: 7–26. DOI: 10.37493/2308-4758.2021.1.1.
- Черепашук А. М., Чернин А. Д. 2004.** *Вселенная, жизнь, черные дыры*. Фрязино: Век 2.
- Шкловский И. С. 1984.** *Звезды: их рождение, жизнь и смерть*. 3-е изд. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры.
- Шмальгаузен И. И. 1961.** Интеграция биологических систем и их саморегуляция. *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отд. биологии* 16(2): 106.
- Язев С. А. 2018.** *Астрономия. Солнечная система*: уч. пособ. для СПО. 3-е изд., перераб. и доп. Иркутск: Иркутский гос. ун-т.
- Японское землетрясение сместило земную ось и укоротило день. 2011.** URL: <https://igd.sfu-kras.ru/oldigd/338.htm>.
- Ярмолюк В. В., Кузьмин М. И. 2021.** Биосфера в геологической истории Земли. В: Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В., Гладкочуб Д. П., Горячев Н. А., Деревянко А. П. и др., *Геологическая эволюция Земли: от космической пыли до обитатели человечества*, гл. 11. Новосибирск: Гео.
- Anderson D. L. 2002.** Plate Tectonics as a Far-from-Equilibrium Self-Organized System. *AGU Geodynamics Series* 30: 1–22.
- Andrews R. G. 2021.** A Massive Subterranean “Tree” is Moving Magma to Earth’s Surface. URL: <https://www.quantamagazine.org/a-massive-subterranean-tree-is-moving-magma-to-earths-surface-20210915/>.
- Aubert J., Amit H., Hulot G., Olson P. 2008.** Thermochemical Flows Couple the Earth’s Inner Core Growth to Mantle Heterogeneity. *Nature Letters* 454(7).

- Baker D. 2014.** Standing on the Shoulders of Giants: Collective Learning as a Key Concept in Big History. *Teaching & Researching Big History: Exploring a New Scholarly Field* / Ed. by L. E. Grinin, D. Baker, E. Quaedackers, A. V. Korotayev, pp. 41–64. Volgograd: “Uchitel” Publishing House.
- Bercovici D. 2003.** The Generation of Plate Tectonics from Mantle Convection. *Earth and Planetary Science Letters* 205: 107–121.
- Bijwaard H., Sparkman W., Engdahl E. R. 1998.** Closing the Gap between Regional and Global Travel Time Tomography. *Journal of Geophysical Research* 103(12): 30055–30078.
- Bottke W. F., Vokrouhlický D., Minton D., Nesvorný D., Morbidelli A., Brasser R., Simonson B., Levison H. F. 2012.** An Archaean Heavy Bombardment from a Destabilized Extension of the Asteroid Belt. *Nature* 485(7396): 78–81. DOI: 10.1038/nature10967.
- Brack A., Horneck G., Cockell C. S., Berces A., Belisheva N. K. et al. 2010.** Origin and Evolution of Life on Terrestrial Planets. *Astrobiology* 10(1): 69–76. DOI: 10.1089=ast.2009.0374.
- Benton M. J. 2003.** *When Life Nearly Died: The Greatest Mass Extinction of All Time*. London: Thames & Hudson.
- Buffett B. A., Seagle C. T. 2010.** Stratification of the Top of the Core due to Chemical Interactions with the Mantle. *Journal of Geophysical Research* 115: 1–10.
- Buis A. 2021.** The Earth’s Magnetic Field has been Around for Almost as Long as the Earth Itself. It Protects Life on Our Planet from Harmful Cosmic Radiation. URL: <https://science.nasa.gov/science-research/earth-science/earths-magnetosphere-protecting-our-planet-from-harmful-space-energy/>.
- Burke K., Steinberger B., Torsvik T., Smethurst M. 2008.** Plume Generation Zones at the Margins of Large Low Shear Velocity Provinces on the Core-Mantle Boundary. *Earth and Planetary Science Letters* 265(1): 49–60.
- Doucet L.-S., Li Z.-X., Ernst R. E., Kirscher U. 2019.** Coupled Supercontinent–Mantle Plume Events Evidenced by Oceanic Plume Record. *Geology* 48(2). DOI: 10.1130/G46754.1
- Early Solar System Impact Bombardment II: Program and Abstract Volume. 2012.** Houston: Lunar and Planetary Institute.
- Gamaleldien H., Doucet L.-S., Li Z.-X., Cox G., Mitchel R. N. 2019.** Global Geochemical Fingerprinting of Plume Intensity Suggests Coupling with the Supercontinent Cycle. *Nature Communications* 10(5270). DOI: 10.1038/s41467-019-13300-4.
- Gomes R., Levison H. F., Tsiganis K., Morbidelli A. 2005.** Origin of the Cataclysmic Late Heavy Bombardment Period of the Terrestrial Planets. *Nature* 435(7041): 466–69. DOI:10.1038/nature03676.
- Grinin L. E. 2010.** The Role of the Individual in History: A Reconsideration. *Social Evolution & History* 9(2): 95–136.
- Grinin L. E. 2018.** Evolution of the Early Solar System in Terms of Big History and Universal Evolution. *Journal of Big History* 2(1): 15–26. URL: <http://lowellgustafson.com/2018/01/>.

- Grinin L. E. 2022.** On Revolutionary Situations, Stages of Revolution, and Some Other Aspects of the Theory of Revolution. *Handbook of Revolutions in the 21st Century: The New Waves of Revolutions, and the Causes and Effects of Disruptive Political Change* / Ed. by J. A. Goldstone, L. Grinin, A. Korotayev, pp. 69–104. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-86468-2_3.
- Grinin L. E. 2024.** Chemical Evolution in Big History. *Journal of Big History* 7(2): 97–105. DOI: 10.22339/jbh.v7i2.7208.
- Grinin L. E. 2025a.** Earth as a Planet, Earth among Other Planets. *Journal of Big History* 8(3). DOI: 10.22339/jbh.v8i3.8302.
- Grinin L. E. 2025b.** Geological Evolution. *Journal of Big History* 8(1): 32–44. DOI: 10.22339/jbh.v8i1.8106.
- Grinin L. E. 2025c.** Geological Evolution: Some Preliminary Ideas, *Journal of Big History* VIII(1): 32–44. DOI: 10.22339/jbh.v8i1.8106.
- Grinin L. E. 2026a.** Chemical Evolution in Cosmos and Earth. *Complexity in Universal Evolution – A Big History Perspective* / Ed. by D. J. LePoire, L. Grinin, A. Korotayev. Cham: Springer Nature (in print).
- Grinin L. E. 2026b.** Geological Evolution: A Bridge between Cosmic and Earthly Development in Big History. *Complexity in Universal Evolution – A Big History Perspective* / Ed. by D. J. LePoire, L. Grinin, A. Korotayev. Cham: Springer Nature (in print).
- Grinin L. E., Korotayev A. V. 2023.** Social Evolution: Theoretical Aspects and General Outlines. *Social Evolution & History* 22(2): 111–158. DOI: 10.30884/seh/2023.02.07.
- Grinin L., Korotayev A. 2025.** Some Possible Methodological Ideas for Periodizing Big History. *Navigating Complexity in Big History – Exploring Periodization across Cosmic and Biosocial Dimensions* / Ed. by D. J. LePoire, L. Grinin, A. Korotayev, pp. 49–71. Cham: Springer Nature.
- Grinin L. E., Markov A. V., Korotayev A. V. 2025.** Biological and Social Phases of Big History and Universal Evolution: Similarities, Differences, and the Growth of Complexity. *Journal of Big History* 9(3): 1–51. DOI: 10.22339/jbh.v8i3.8301.
- Grinin L., Markov A., Korotayev A. 2026.** Biological and Social Phases of Big History: Similarities, Differences, and the Growth of Complexity. *Complexity in Universal Evolution – A Big History Perspective* / Ed. by D. J. LePoire, L. Grinin, A. Korotayev. Cham: Springer Nature (in print).
- Hazen R. M., Papineau D., Bleeker W., Downs R. T., Ferry F., McCoy T., Sverjensky D., Yang H. 2008.** Mineral Evolution. *American Mineralogist* 93: 1693–1720.
- Hazen R. M., Sverjensky D. A. 2010.** Mineral Surfaces, Geochemical Complexities, and the Origins of Life. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* 2: a002162.
- Hazen R. M., Wong M. L. 2024.** Open-Ended versus Bounded Evolution: Mineral Evolution as a Case Study. *PNAS Nexus* 3(7): pgae248. DOI: 10.1093/pnasnexus/pgae248.
- Hofmann A. W. 1997.** Mantle Geochemistry: The Message from Oceanic Volcanism. *Nature* 385: 219–229.

- Johnson B. C., Melosh H. J. 2012.** Impact Spherules as a Record of an Ancient Heavy Bombardment of Earth. *Nature* 485 (7396): 75–77. DOI: 10.1038/nature10982.
- Kasting J. F. 1993.** Earth's Early Atmosphere. *Science* 259: 920–926.
- Kim D., Ménard B., Baron D., Taghizadeh-Popp M. 2020.** Equencing Seismograms: A Panoptic View of Scattering in the Core-Mantle Boundary Region. *Science* 368(6496): 1223–1228. DOI: 10.1126/science.aba8972.
- Kump, L. R., Kasting, J. F., Crane, R. G. 2010.** *The Earth System*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Lenton T. M., Held H., Kriegler E., Hall J. W., Lucht W., Rahmstorf S., Schellnhuber H. J. 2008.** Tipping Elements in the Earth's Climate System. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(6): 1786–1793.
- LePoire D., Grinin L., Korotayev A. (Eds.). 2025.** *Navigating Complexity in Big History – Exploring Periodization across Cosmic and Biosocial Dimensions* / Ed. by D. J. LePoire, L. Grinin, A. Korotayev. Cham: Springer Nature (in print).
- LePoire D. J., Grinin L., Korotayev A. 2026.** Introduction to Complexity Theory for Big History. *Complexity in Universal Evolution – A Big History Perspective* / Ed. by D. J. LePoire, L. Grinin, A. Korotayev. Cham: Springer Nature (in print).
- Maruyama S., Santosh M., Zhao D. 2007.** Superplume, Supercontinent, and Post-Perovskite: Mantle Dynamics and Anti-Plate Tectonics on the Core-Mantle Boundary. *Gondwana Research* 11: 7–37.
- Nebel O., Rapp R. P., Yaxley G. M. 2014.** The Role of Detrital Zircons in Hadean Crustal Research. *Lithos* 190–191: 313–327.
- Nogrady B. 2023.** Secrets of Earth's Inner Core Revealed by Large Quakes. *Nature* February 2022. URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-023-00496-1>.
- Olson P. L., Glatzmaier G. A., Coe R. S. 2011.** Complex Polarity Reversals in a Geodynamo Model. *Earth and Planetary Science Letters* 304: 168–179.
- Pastor-Galán D., Nance R. D., Murphy J. B., Spencer C. J. 2019.** Supercontinents: Myths, Mysteries and Milestones. *Fifty Years of the Wilson Cycle Concept in Plate Tectonics* / Ed. by R. W. Wilson, G. A. Houseman, K. J. W. McCaffrey, A. G. Doré, S. J. H. Buiter, pp. 39–64. London: The Geological Society of London.
- Plank T., Langmuir C. H. 1998.** The Chemical Composition of Subducting Sediment and Its Consequences for the Crust and Mantle. *Chemical Geology* 145: 325–394.
- Rudnick R. L., Fountain D. M. 1995.** Nature and Composition of the Continental Crust: A Lower Crustal Perspective. *Reviews of Geophysics* 33: 267–309.
- Sobolev A. V., Asafov E. V., Gurenko A. A., Arndt N. T., Batanova V. G., Portnyagin M. V., Garbe-Schönberg D., Wilson A. H., Byerly G. R. 2019.** Deep Hydrous Mantle Reservoir Provides Evidence for Crustal Recycling before 3.3 Billion Years Ago. *Nature* 571(7766): 555–559. DOI: 10.1038/s41586-019-1399-5.
- Solomatov V. S., Jain Ch. 2025.** On the Possibility of Convection in the Venusian Crust. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 361: 107332. DOI: 10.1016/j.pepi.2025.107332. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0031920125000263?via%3Dihub>.
- Spencer H. 1862.** *First Principles*. 1st ed. London: Williams & Norgate.

- Spencer H. 1896.** *A System of Synthetic Philosophy*. London: Williams & Norgate.
- Voosen P. 2022.** The Planet Inside. Scientists are Probing the Secrets of the Inner Core – and Learning How It Might have Saved Life on Earth. *Science* March 31. URL: <https://www.science.org/content/article/scientists-probing-secrets-earths-inner-core-saved-life-planet>.
- Steffen W., Sanderson R. A., Tyson P. D., Jäger J., Matson P. A., Moore III. B., Oldfield F., Richardson K., Schellnhuber H.-J., Turner B. L., Wasson R. J. 2004.** *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*. Berlin: Springer-Verlag.
- Tsekhmistrenko M., Sigloch K., Hosseini K., Barruol G. 2021.** A Tree of Indo-African Mantle Plumes Imaged by Seismic Tomography. *Nature Geoscience* 14: 612–619. DOI: 10.1038/s41561-021-00762-9.
- Voosen P. 2022.** The Planet Inside. *Science* March 31. URL: <https://www.science.org/content/article/scientists-probing-secrets-earths-inner-core-saved-life-planet>.
- Wedepohl K. H. 1995.** The Composition of the Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59(7): 1217–1237.
- Wilson J. T. 1966.** Did the Atlantic Close and Then Re-Open? *Nature* 211: 676–681.
- Wong M. L., Cleland C. E., Arend D. Jr., Bartlett S., Cleaves H. J. II, Demarest H., Prabhu A., Lunine JI., Hazen R. M. 2023.** On the Roles of Function and Selection in Evolving Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 120(43): e2310223120. DOI: 10.1073/pnas.2310223120. URL: https://www.researchgate.net/publication/374770989_On_the_roles_of_function_and_selection_in_evolving_systems.
- Workshop on Early Solar System Impact Bombardment III. 2012.** LPI Contribution No. 1826. Houston: Lunar and Planetary Institute.