

Обучающаяся материя или сложная релаксация?

Резервуарные вычисления, сетевые субстраты

и

самонастройка в системе звезда–планета–биосфера

Версия 5

Краснов Евгений Русланович

Аннотация

Способно ли вещество недр планет и звёзд самоstructuringоваться в физические сети, аналогичные нейронным, и могут ли системы «звезда–планета–биосфера» объединяться в единую самообучающуюся структуру с естественной обратной связью? В настоящей работе вводится операционный аппарат, разграничивающий сетевую функциональность и диссипативную релаксацию, проводится обзор субстратов недр по измеримым критериям резервуара (включая предельные случаи чёрных дыр и элементарных частиц) и показывается, что каноническое возражение о термическом разрушении недействительно на макромасштабах. Гипотеза о том, что нейтринные потоки обеспечивают обратную связь для обучения системы звезда–планета, строго тестируется и отвергается на основе дефицита энергии в 12–13 порядков и соотношения длины свободного пробега нейтрино с радиусом звезды. Предлагается ранжированный набор естественных кандидатов механизмов обратной связи — от приливных g -мод и «крыльев Альфвена» до сейсмических мод планет, дислокационных сетей в ядрах планет, резонансов Шумана и биогеохимических циклов (включая гипотезу Свенсмарка, рассмотренную с учётом существующей критики) — с явными фальсификаторами для каждого. Выдвигается гипотеза о том, что замкнутые петли обратной связи в системе «звезда–планета–биосфера» могут приводить к процессу направленной стабилизации всей системы в направлении увеличения стабильности биосферных условий, и обсуждается возможность того, что текущая конфигурация системы Солнце–Земля–Луна является результатом такой стабилизации. Предлагаются конкретные вычислительные тесты, в том числе моделирование N -тел с частотно-зависимыми числами Лява для оценки того, могут ли вызванные пребиотическими процессами приливные изменения поддерживать резонансную синхронизацию в условиях стохастических возмущений. Настоящая программная статья не утверждает, что звёзды мыслят; она предлагает строгий

операционный аппарат для тестирования границы между релаксирующей и обучающейся материей и формулирует 27 проверяемых гипотез. Концепция подтверждается численным моделированием редуцированной МГД-модели, демонстрирующим вычислительную ёмкость системы и выявляющим «парадокс перестабильзации», который показывает, что долгосрочная обитаемость требует сбалансированной, а не максимальной силы обратной связи.

Ключевые слова: резервуарные вычисления; спиновые стёкла; нейтронные звёзды; ядерная паста; взаимодействие звезда–планета; нейтринный канал; резонанс Шумана; гипотеза Свенсмарка; направленная стабилизация; петлевая квантовая гравитация; Гайя.

1. Введение

Программные статьи ставят целью открытие направлений, а не сообщение результатов. Среди исторических прецедентов — концепция живого вещества Вернадского (1926) [1], работа Шрёдингера «Что такое жизнь?» (1944) [2], гипотеза Гайи Лавлока и Маргулис (1974) [3], оценка Ллойдом вычислительной ёмкости Вселенной (2002) [4] и современная формулировка интеллекта как планетарного процесса Франка, Гринспуна и Уокер (2022) [5]. Современным концептуальным прецедентом является программная гипотеза «мир как нейронная сеть» [6], рассматривающая обучающуюся динамику как кандидат фундаментального описания физической реальности; настоящая работа предлагает конкретную астрофизическую реализацию этой идеи для системы звезда–планета–биосфера с измеримыми предсказаниями.

Основная гипотеза. В сверхэкстремальных условиях — внутри планет, звёзд, и, потенциально, внутри чёрных дыр или элементарных частиц — вещество способно самоструктурироваться в физические сети или их аналоги. Звезда, её планеты (включая крупные спутники с глобальными океанами) и (при наличии жизни) биосфера гипотетически объединяются в единую самообучающуюся макроструктуру с замкнутой естественной обратной связью.

Три барьера исторически препятствовали постановке вопроса. (i) Молекулярный барьер: допущение, что температуры недр разрушают любые сложные структуры. (ii) Телеологический барьер: предположение, что обучение требует цели, тогда как формальная теория требует лишь двухмасштабной динамики с правилом модификации. (iii) Дисциплинарный барьер: разобщённость сообществ астрофизиков, гелиосейсмологов, специалистов по резервуарным вычислениям и исследователей системы Земли.

Объём и ограничения. Текст не содержит новых экспериментальных данных; это концептуальный синтез. Не утверждается, хотя и не отрицается, что звёзды обладают сознанием или целенаправленным поведением. Биологические системы демонстрируют способность к сложной самоорганизации и формированию структур с вычислительными свойствами — прежде всего, нейронных сетей мозга. Принципиально важно, что нейросетевая функциональность определяется не биологической природой субстрата как таковой, а абстрактной структурой взаимодействий между элементами: наличием узлов с метастабильными состояниями, связями переменной силы и нелинейной пороговой динамикой. Данное положение является методологическим постулатом (рабочей гипотезой) настоящей программы, а не эмпирически доказанным фактом. Лишь предполагается, что аналогично тому, как логика вычислений не привязана к конкретному физическому носителю — электронному транзистору, оптическому элементу или молекуле ДНК, — нейросетевая функциональность не привязана к биологическому субстрату. Биологическая основа является лишь одним из возможных физических носителей этой функциональности, а не её необходимым условием. Это даёт основания рассматривать самоструктурирование вещества в сложные функциональные сети как процесс, в принципе возможный не только в земных биологических системах, но и в иных физических системах при иных физико-химических условиях. Конкретные механизмы такого самоструктурирования, если оно реализуется за пределами известных биологических систем, могут существенно отличаться от земных. Термин «обучение» в настоящей работе используется исключительно в формальном смысле теории динамических систем: модификация медленных переменных (аналогов синаптических весов) под воздействием естественного сигнала качества. В технических терминах речь может идти о системе, функционирующей на уровне самонастраивающегося регулятора — устройства, автоматически корректирующего свои параметры для поддержания заданных режимов работы без какого-либо понимания, интенциональности или субъективного опыта. Именно в этом узком, операциональном смысле употребляется слово «обучение» на протяжении всего текста. Таким образом, утверждение об отсутствии привязанности нейросетевой функциональности к биологическому субстрату следует рассматривать строго как методологическое допущение, допускающее фальсификацию, а не как постулируемую истину.

Определив рамки исследования, далее перейдём к формализации операционных критериев, без которых дальнейшая дискуссия оставалась бы на уровне метафор.

Во избежание терминологического загрязнения, в настоящей работе используются следующие строгие операциональные определения:

Нейросетевая функциональность: наличие в физической среде топологии узлов с метастабильными состояниями, связей переменной силы и нелинейной пороговой динамики, допускающей формальное описание в рамках теории резервуарных вычислений или спиновых стёкол, независимо от биологической природы субстрата.

Обучение (в физическом смысле): двухмасштабная динамика (уравнение 2), при которой медленные переменные системы (аналоги синаптических весов) модифицируются под воздействием нетривиального сигнала качества R , что отличает процесс от простой термодинамической релаксации к локальному минимуму свободной энергии.

Направленная стабилизация: эмерджентный режим работы системы с обратной связью, при котором конфигурации, обеспечивающие долговременную устойчивость подсистемы (например, биосферы), селективно удерживаются, а дестабилизирующие конфигурации элиминируются, без привлечения телеологических (целеполагающих) механизмов.

2. Операционные критерии

2.1. Формальное определение сетевой структуры и обучения

Сетевая система определяется как тройка $\langle S, T, P \rangle$: множество узлов S с дискретными или метастабильными состояниями; топология T , задающая связи переменной силы; пороговая динамика P — нелинейное отображение «вход–выход» с барьером активации. Гамильтониан спинового стекла Шеррингтона–Киркпатрика [7], применённый Хопфилдом [8] для описания ассоциативной памяти на основе пороговой модели Маккаллоха–Питса [9], имеет вид:

$$H = -(1/2) \cdot \sum_{ij} [T_{ij} \cdot s_i \cdot s_j] \quad (1)$$

В оригинальной модели Хопфилда матрица весов удовлетворяет двум условиям: симметричность ($T_{ij} = T_{ji}$) и нулевые диагональные элементы ($T_{ii} = 0$). Симметричность обеспечивает существование энергетической функции и сходимость динамики к локальным минимумам; нулевая диагональ исключает само-взаимодействие. В обобщённых сетевых моделях, рассматриваемых в настоящей работе, эти условия могут ослабляться (например, допустимы направленные связи), что требует модификации энергетического формализма.

Любая среда с фрустрированной решёткой взаимодействий является сетью в функциональном смысле. Открытые вопросы — статистика T_{ij} и наличие пластичности (правило Хебба [10] как минимальный случай; применение к спиновым стёклам см. [11–13]).

Самообучающаяся система определяется двухмасштабной динамикой:

$$dx/dt = F(x, w); dw/dt = \varepsilon \cdot G(x, w; R), \varepsilon \ll 1 \quad (2)$$

где $\mathbf{x}$ — быстрые состояния, $\mathbf{w}$ — медленные веса, $\mathbf{G}$ — правило модификации, R — сигнал качества. Параметр R вводится как формальная величина; его физическая природа обсуждается в разделе 7.3.1 как открытая задача. Кандидаты в «учителя», доступные неживой природе: соотношения взаимности Онсагера [14], диссипативные структуры [15], термодинамика предсказания [16], диссипативная адаптация [17, 18], автокаталитическая фиксация [19]. Метрики разграничения обучения и релаксации: ε -машины [20] и предиктивная информация [21]. Содержательность утверждения об «обучении» полностью определяется природой R : при тривиальном или отсутствующем R система релаксирует, а не обучается.

Вставка 1. Иерархия утверждений. Аналогия $\rightarrow$ статистический изоморфизм $\rightarrow$ резервуарная функциональность (измерима) $\rightarrow$ обучение (уравнение 2 с нетривиальным R ; измеримо). Только уровни 3–4 являются научными утверждениями.

2.2. Резервуар

Среда квалифицируется как резервуар при удовлетворении трём измеримым условиям [22, 23]: свойство эхо-состояния, свойство разделения, затухающая память. Резервуарные вычисления универсальны на произвольных нелинейных диссипативных средах при наличии считывателя [24–27]. Критически важно, что резервуар без считывателя — это просто диссипативная среда со сложной переходной динамикой, а не вычислительное устройство. Физическое обучение «снизу» продемонстрировано: пассивные резисторные сети выполняют градиентный спуск без цифрового контроллера [28]; топологические дефекты реализуют синаптическую пластичность [29]. Класс физических резервуаров не исчерпывается конденсированными средами: резервуарные вычисления продемонстрированы на турбулентной конвекции Рэлея–Бенара с редукцией до 150 POD-мод [30] и на наноманитных кольцевых массивах [31], что напрямую обосновывает перенос теории РС на сплошные и магнитные среды, рассматриваемые ниже.

2.3. Универсальность пороговых систем

2.3.1. Математический аппарат пороговой динамики

Пороговые системы описываются нелинейными динамическими уравнениями с характерной функцией активации $f(x)$, имеющей резкий переход в окрестности критического значения

хс. Степенные лавины универсальны для пороговых систем [32–35]. Нейронные лавины при коэффициенте ветвления $\sigma_{\text{branch}} \approx 1$ [36, 37] разделяют показатели скейлинга с последовательностями землетрясений [32, 38], солнечными вспышками [39] и глитчами нейтронных звёзд [40]. Совпадение показателей устанавливает принадлежность к классу универсальности, но не вычисление.

2.3.2. Критерии порогового поведения: опровержение молекулярного барьера

Молекулярный барьер, упомянутый во Введении, основан на переносе молекулярного аргумента (отдельные молекулы разрушаются при высоких температурах недр) на макроскопические коллективные конфигурации. Этот перенос неправилен: критерий жизнеспособности метастабильного состояния является масштабозависимым:

$$E_{\text{switch}} / (k_B \cdot T) \gg 1 \quad (3)$$

с временем жизни конфигурации:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp(E_b / (k_B \cdot T)) \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) используются следующие обозначения. E_{switch} и E_b — энергия, необходимая для переключения между метастабильными состояниями (активационный барьер); в формуле (3) она сравнивается с характерной тепловой энергией, в формуле (4) определяет время жизни конфигурации. k_B — постоянная Больцмана (1.38×10^{-23} Дж/К), фундаментальная константа, связывающая температуру с энергией. T — характерная температура среды, в которой находится конфигурация. τ — время жизни конфигурации, то есть характерное время, в течение которого конфигурация сохраняется до термически активированного переключения. τ_0 — характерное микроскопическое время, связанное с элементарными процессами в системе; для атомных колебаний $\tau_0 \sim 10^{-12}$ – 10^{-9} с.

Физический смысл формул состоит в следующем. Отношение $E_b/(k_B \cdot T)$ сравнивает энергию, необходимую для разрушения конфигурации, с характерной тепловой энергией среды. Если это отношение много больше единицы, тепловые флуктуации не способны разрушить конфигурацию за характерное время динамики системы, и конфигурация метастабильна. Время жизни конфигурации растёт экспоненциально с увеличением отношения: удвоение отношения приводит к возведению времени жизни в квадрат. Именно эта экспоненциальная зависимость обеспечивает колоссальные времена жизни макроскопических конфигураций даже при высоких температурах недр.

Для отдельных молекул при звёздных температурах условие (3) не выполняется; для макроскопических коллективных конфигураций оно выполняется с большим запасом. Рассмотрим несколько примеров, непосредственно связанных с субстратами из Таблицы 1:

Конвективная ячейка на Солнце (гранула). Характерный размер $L \sim 10^6$ м, плотность в фотосфере $\rho \sim 10^{-4}$ кг/м³, масса $m \sim \rho L^3 \sim 10^{14}$ кг. При температуре $T \sim 6000$ К и удельной теплоёмкости $c_v \sim 10^4$ Дж/(кг·К), тепловая энергия ячейки $E \sim m \cdot c_v \cdot T \sim 6 \cdot 10^{21}$ Дж. Отношение $E/(k_B \cdot T) \approx 6 \cdot 10^{21} / (1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 6000) \approx 7 \cdot 10^{40}$, что гарантирует метастабильность ячейки на временах конвективного оборота (~ 10 минут).

Магматический поток в мантии Земли. Размер ~ 1 км, температура мантии ~ 1300 К, энергия $\sim 10^{17}$ Дж. Отношение $E/(k_B \cdot T) \approx 10^{37}$, что обеспечивает метастабильность потока на временах, много превышающих характерные времена мантийной конвекции. Это аналог «медленной переменной» в планетарной сети — структуры, хранящей память о предыдущих состояниях.

Магнитная трубка в тахоклине Солнца. Радиус $r \sim 10^5$ м, длина $l \sim 10^8$ м, объём $V \sim 3 \cdot 10^{18}$ м³. Плотность $\rho \sim 10^2$ кг/м³. Энергия магнитного поля при $B \sim 1$ Тл (10^4 Гс): плотность энергии $u_B = B^2/(2\mu_0) \approx 4 \cdot 10^5$ Дж/м³, полная энергия $E_B = u_B \cdot V \sim 10^{24}$ Дж. При $T \sim 2 \cdot 10^6$ К, отношение $E_B/(k_B \cdot T) \approx 10^{24} / (1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 2 \cdot 10^6) \approx 4 \cdot 10^{40}$, что обеспечивает топологическую устойчивость трубки против тепловой диффузии на временах, много превышающих характерные времена конвективной динамики.

Топологический дефект ядерной пасты нейтронной звезды. Дефект размером ~ 10 фм содержит ~ 60 нуклонов. Энергия связи ~ 1 МэВ на нуклон даёт полную энергию $E \sim 10^{-11}$ Дж. При $T \sim 10^8$ К отношение $E/(k_B \cdot T) \approx 10^4$ обеспечивает метастабильность дефекта на временах, много превышающих характерные времена ядерной динамики. Это прямой аналог «узла» в нейросетевой топологии нейтронных звёзд.

Отдельный нуклон в ядерной пасте. Размер 1 фм, энергия связи в ядерной материи ~ 1 МэВ $= 1.6 \times 10^{-13}$ Дж. Отношение $E/(k_B \cdot T) \approx 10^2$ при $T \sim 10^8$ К. Этот пример показывает, что метастабильность обеспечена даже на уровне отдельных нуклонов, поскольку энергия ядерной связи (1 МэВ) много превышает тепловую энергию (~ 10 кэВ) даже в самых горячих молодых нейтронных звёздах. Это фундаментальный уровень, на котором формируется вся структура ядерной пасты.

Во всех перечисленных случаях конфигурации метастабильны, несмотря на высокие температуры. Это опровергает молекулярный барьер и обосновывает возможность сетевой функциональности в недрах планет и звёзд.

Следует подчеркнуть, что приведённые оценки являются порядковыми и служат для иллюстрации масштабозависимости критерия. Конкретные механизмы метастабильности в каждом случае различны: динамическая устойчивость конвективных ячеек, вязкоупругая память мантийных потоков, топологическая защита дефектов ядерной пасты и энергия ядерной связи отдельных нуклонов.

2.3.3. Операционные пределы применимости

Среда вычисляет только в том случае, если помимо статистики лавин она удовлетворяет критериям резервуара раздела 2.2 и проявляет зависящий от истории отклик при фиксированных мгновенных параметрах. Смещение универсальной релаксации с универсальным вычислением является центральным методологическим риском программы, и его следует формулировать явно. Гипотезы программы применимы к системам, демонстрирующим пороговое поведение с метастабильными состояниями и пластичностью связей. В системах, где эти условия не выполняются (например, в простых диссипативных средах без топологических дефектов), нейросетевая функциональность отсутствует, и гипотезы программы не применяются.

Установив формальный аппарат, далее перейдём к конкретным физическим субстратам, способным удовлетворять введённым критериям.

3. Субстраты недр

Проведём обзор субстратов-кандидатов по критериям раздела 2. Ключевые свойства обобщены в таблице 1.

Таблица 1. Субстраты недр и их сетевые свойства.

Среда	Сетевая переменная	Метаустойчивость / память	Пороговая динамика	Естественный считыватель
Ядерная паста ($\rho = 10^{13}\text{--}10^{14} \text{ г/см}^3$)	Топология дефектов (спагетти, лазанья) [63–65]	Стеклообразное старение [64]	Предел текучести [129]	Гравитационно-волновой отклик (предсказанный, не подтверждённый)
Вихрево-флюксонидная сеть (нейтронная звезда)	Положения вихрей и флюксонидов	Термически активированный крип [130]; лавины при глитчах [40]	Барьер закрепления [43, 67]	Остатки тайминга, рентгеновское излучение
Кристалл белого карлика	Структура кристаллических доменов	Последовательность кристаллизации [131, 46]; сегрегация ^{22}Ne [47]	Барьер нуклеации	Функция светимости (Gaia)
Суперионный лёд (недра ледяных гигантов)	Кислородная подрешётка + протонная динамика	Смешанная твёрдо-жидкая фаза [132, 133]	Барьер протонной диффузии [134]	Морфология магнитного поля
Разбавленное ядро Юпитера	Профиль состава и градиенты плотности	Частично растворённое тяжёлое ядро [51]	Композиционный барьер	Гравитационные гармоника (Juno)
Металлический водород (недра газовых гигантов)	Сверхпроводящая флюидная фаза [48]	Фазовый переход диэлектрик–металл [50, 49]	Барьер металл–диэлектрик	Магнитное поле планеты
Геодинамо	Топология конвективных ячеек; конфигурация поля	Бистабильная стохастическая система [135]; кластеризация инверсий [136]	Порог конвекции / инверсии	Палеомагнитная запись
Осцилляционная полость звезды	Амплитуды и связи нормальных мод	$10^6\text{--}10^7$ мод [70]; реликтовые поля $\geq 10^9$ лет [137]	Порог возбуждения моды	Астросейсмология (TESS, PLATO)
Мантия Земли (аналог пасты)	Фазовая структура пост-перовскита	Фазовые переходы; вязкоупругая память	Барьер фазового перехода	Сейсмическая томография
Внутреннее ядро Земли (аналог вихревой сети)	Дислокации в ОЦК-железе; текстура	Анизотропная кристаллизация; память	Барьер дислокационного движения	Сейсмическая анизотропия
Внешнее ядро Земли (аналог флюксонидной сети)	Магнитные флюксовые трубки	Вихревая динамика; обратные каскады	Барьер магнитной диффузии	Геомагнитные вариации
Микробный консорциум (сообщество)	Состав гильдий (таксономические/функциональные состояния)	Споры, биоплёнки, рефугии (затухающая память)	Фазовые переходы сообщества (температура, pH, редокс)	Биогеохимический газовый выход (CO_2 , O_2 , CH_4); состав сообщества (16S)

Число элементов. Плотности вихрей и флюксонидов в нейтронной звезде: $n_v = 2\Omega/\kappa$ (где $\kappa = \hbar/2m_n \approx 2 \times 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$) и $n_\Phi = V/\Phi_0$ (где $\Phi_0 = \hbar/2e \approx 2 \times 10^{-7} \text{ Гс}\cdot\text{см}^2$). Для типичной нейтронной звезды с периодом $\sim 1 \text{ с}$ и полем $\sim 10^{12} \text{ Гс}$ это даёт $\sim 10^{16}$ вихрей и $\sim 10^{31}$ флюксонидов. Следует отметить, что приведённые оценки относятся к типичной нейтронной звезде с периодом $\sim 1 \text{ с}$.

Для миллисекундных пульсаров ($P \sim 1\text{--}10$ мс) число вихрей возрастает на 2–3 порядка, достигая $\sim 10^{18}\text{--}10^{19}$. Для магнитаров ($B \sim 10^{14}\text{--}10^{15}$ Гс) число флюксоидов возрастает до $\sim 10^{33}\text{--}10^{34}$. Следует подчеркнуть, что само по себе число элементов не является вычислительным аргументом: существенны структура связности, наличие направленных петель и существование правил пластичности.

Планетные аналоги. Примечательно, что аналоги экстремальных субстратов нейтронных звёзд обнаруживаются и в недрах планет. Внутреннее ядро Земли демонстрирует сложную текстуру кристаллизации железа с дислокационными сетями, напоминающую по топологии дефектные структуры. Процессы трения и проскальзывания в земных недрах описаны в [41, 42]. Внешнее жидкое ядро, генерирующее геомагнитное поле, содержит вихревые токовые структуры — прямые аналоги вихревой сети сверхтекучей нейтронной жидкости [43]. Отдельные магнитные трубки несут продольные, поперечные и крутильные волны, распространяющиеся вдоль трубки [44]; примечательно, что в нейронных контурах динамические флюкс-трубки описаны как «резервуары устойчивости» — области фазового пространства, удерживающие траектории, тогда как между трубками траектории расходятся экспоненциально [45], — структура, изоморфная резервуарным вычислениям на границе хаоса (раздел 6.0.4). Мантия Земли, с её фазовыми переходами в минералах пост-перовскита и бриджманита, представляет собой вязкоупругую среду с богатой топологией, потенциально способной к хранению медленных переменных. Для полноты картины можно отметить, что эволюция белых карликов также демонстрирует эффекты структурной памяти в их недрах: процессы кристаллизации вырожденного ядра и гравитационной седиментации изотопов (в частности, ^{22}Ne) [46, 47] приводят к формированию долгоживущих доменных структур, которые сохраняют информацию о термической и химической истории звезды на масштабах миллиардов лет.

Экзотические субстраты планет-гигантов. Внутри Юпитера и Сатурна при давлениях порядка мегабаров водород переходит в металлическое состояние, впервые предсказанное Вигнером и Хантингтоном в 1935 году [48] и исследованное в современных экспериментах по ударному сжатию [49]; см. также обзор свойств водорода и гелия при экстремальных условиях [50]. Данные миссии *Юно* указывают на «разбавленное» тяжёлое ядро Юпитера со сложным профилем состава [51] — потенциальным субстратом для долгоживущих композиционных сетевых структур.

Можно указать на существование и других гипотетических кандидатов в субстраты, но поскольку их обсуждение носит довольно спекулятивный характер и не является прямой темой статьи, информация о них приведена в Приложении 1.

Установив субстраты, способные удовлетворять критериям масштабно-зависимой шумовой изоляции (3)–(4), перейдём к вопросу о каналах связи между отдельными элементами и их объединении в единую самообучающуюся систему.

4. Каналы связи и проблема обратной связи

Чтобы система «звезда–планета–биосфера» функционировала как единая самообучающаяся структура, должны существовать замкнутые контуры обратной связи как внутри отдельных элементов, так и между ними. Далее проводится систематический анализ таких контуров.

4.1. Обратная связь внутри элементов

4.1.1. Внутри звезды

Ранг 1: Акустико-гравитационные колебания (р- и g-моды). Звёздные осцилляции переносят информацию между различными слоями звезды [70, 71]. р-моды (акустические) зондируют конвективную зону, g-моды (гравитационные) — радиативное ядро. Резонансное взаимодействие между ними способно модулировать дифференциальное вращение и тахоклон [72], перестраивая глобальное звёздное динамо.

Ранг 2: Магнитогидродинамические волны. Альфеновские волны, генерируемые в конвективной зоне, способны проникать в радиативное ядро вдоль силовых линий реликтового поля, модулируя внутреннюю магнитную топологию и влияя на глобальное звёздное динамо [72].

4.1.2. Внутри планеты

Ранг 1: Сейсмические (акустические) волны. Глобальные сейсмические моды Земли (свободные колебания после крупных землетрясений) переносят энергию через всю планету, модулируя фазовые переходы в мантии и кристаллизацию внутреннего ядра. Это прямой аналог звёздных р-мод.

Ранг 2: Вихревые структуры внешнего ядра. Магнитные флюксовые трубки в жидком желе внешнего ядра образуют вихревую сеть — аналог вихревой сети нейтронной звезды [43].

Их взаимодействие с конвективными потоками способно модулировать геомагнитное поле на временах от лет до тысячелетий.

Ранг 3: Дислокационные сети внутреннего ядра. Топологические дефекты в кристаллической структуре железа внутреннего ядра образуют медленно эволюционирующую сеть, хранящую память о предыдущих состояниях и модулирующую сейсмическую анизотропию. Родственные процессы трения и проскальзывания в геологических средах описаны в [41, 42].

4.2. Обратная связь между элементами системы «звезда–планета»

Рассмотрим кандидатов на роль обратной связи в подсистеме «звезда–планета», ранжированных по их способности модулировать внутреннюю структуру обоих тел, а затем протестируем и отвергнем нейтринную гипотезу.

Ранг 1: Приливной резонанс с внутренними g-модами звезды. Гравитационный потенциал планеты резонансно захватывает внутренние g-моды в радиативном ядре звезды [73, 74]. Это наиболее прямой механизм передачи энергии с орбиты в глубокие недра: резонансное возбуждение модулирует дифференциальное вращение ядра и тахоклин, перестраивая глобальное звёздное динамо [72]. Планета напрямую «обучает» (модифицирует) внутреннюю магнитную структуру звезды. Резонансное захватывание подтверждено наблюдениями для спутников Сатурна [75] и предложено для планет-гигантов [76].

Ранг 2: Магнитное взаимодействие через «крылья Альфвена» (Alfvén Wings). Магнитосфера или ионосфера планеты, движущаяся в звёздном ветре, генерирует альфвеновские волны, которые распространяются вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля обратно к звезде [77–79]. Хотя основная диссипация происходит в хромосфере (создавая орбитально-фазированные горячие пятна), при наличии сильного глобального поля звезды возмущения могут проникать глубже, модулируя магнитную топологию тахоклина.

Ранг 3: Аккреция планетного вещества. Интенсивное испарение горячих юпитеров или приливное разрушение малых планет приводит к потоку тяжёлых элементов в конвективную зону звезды [80, 81]. Локальное обогащение меняет непрозрачность плазмы, профиль конвекции и, как следствие, эффективность звёздного динамо на масштабах миллионов лет. Этот механизм подтверждается наблюдениями «загрязнённых» белых карликов, в атмосферах которых обнаружены тяжёлые элементы планетарного происхождения [80], что позволяет реконструировать химический состав поглощённых планет.

Ранг 4: Индукционный нагрев недр планеты. Замыкает петлю: магнитная активность звезды, модулированная планетой (через механизмы рангов 1–2), изменяет давление звёздного ветра и потоки частиц, воздействующих на планету. Переменное внешнее поле индуцирует токи в проводящих недрах планеты (джоулев нагрев), модулируя её внутреннюю термическую и магнитную структуру. Пример сильной приливной диссипации в экзопланете — WASP-12b [82].

4.2.1. Нейтринная гипотеза обратной связи: тестирование и отвержение

Первоначально привлекательной гипотезой является предположение, что петля обратной связи в подсистеме «звезда–планета» опосредована лишь нейтрино. Проведём строгий анализ этой гипотезы.

Аргументы «за»:

1. Нейтрино — единственный прямой сигнал из ядра звезды (фотоны диффундируют $\sim 10^5$ лет, нейтрино вылетают за секунды).
2. Вещество модулирует поток через эффект Михеева–Смирнова–Вольфенштейна [83, 84].
3. Когерентное упругое нейтрино-ядерное рассеяние (COHERENT [85]) с сечением $\sigma \approx (G_F^2/4\pi) \cdot Q_w^2 \cdot E_\nu^2$ обеспечивает максимально возможную связь вещества с нейтрино. Сечения нейтрино-ядерных взаимодействий при низких энергиях детально рассчитаны в работах [86, 87].
4. Коллективные нейтринные осцилляции [88] могут усиливать связь в сверхновых.
5. Нейтринное охлаждение играет ключевую роль в эволюции нейтронных звёзд [89, 90] и белых карликов [91], модулируя их внутреннюю структуру (см. также обзор [92]).

Аргументы против:

1. Неэффективность записи (звезда $\rightarrow$ планета). Солнце испускает колоссальный поток нейтрино, однако сечение их взаимодействия с веществом при энергиях ~ 1 МэВ составляет $\sim 10^{-44}$ см². Колонная плотность Земли составляет $\sim 3 \times 10^{33}$ нуклонов/см², что даёт вероятность взаимодействия при пролёте через Землю: $P_{\text{int}} \approx \sigma \cdot N \approx 10^{-11}$. Полная энергия, депонируемая солнечными нейтрино в Земле, составляет $\sim 10^4$ Вт, что на 9 порядков меньше геотермального теплового потока (4.7×10^{13} Вт) при дефиците сечения взаимодействия 12–13 порядков. Следовательно, даже если звезда «пишет» нейтрино, планета их практически не «читает» — энергетическое воздействие недостаточно для влияния на геодинамику, тектонику или биосферу.

2. Невозможность обратной записи (планета $\rightarrow$ звезда). Планета не обладает механизмом генерации направленного нейтринного потока. Геонейтрино Земли (от радиоактивного распада U, Th, K) испускаются изотропно и их поток ничтожен по сравнению с солнечным. Даже гипотетическая модуляция планетарного нейтринного потока не была бы «прочитана» звездой из-за того же ничтожного сечения взаимодействия. Канал является однонаправленным и неэффективным в обе стороны.

3. Свободный выход нейтрино (отсутствие захвата). Длина свободного пробега нейтрино в солнечном веществе составляет $\lambda \approx 10^{18}\text{--}10^{19}$ см (для характерных плотностей ядра Солнца, где рождаются нейтрино), что на 7–8 порядков превышает радиус звезды (7×10^{10} см). Нейтрино свободно покидают звезду главной последовательности; гравитационного захвата не происходит, и возвратного нейтринного потока от звезды к планете не формируется. Нейтрино не могут быть «заперты» в системе для создания устойчивой петли обратной связи.

4. Симметрия приливного потенциала. Приливной потенциал планеты не модулирует локальную скорость термоядерных реакций в ядре звезды, хотя может влиять на гидродинамическое смешивание через сдвиговые моды.

Вердикт: нейтринный канал является «немым» каналом: сигнал передаётся, но не принимается. Нейтрино свободно проходят через вещество звезды и планеты, не оказывая на него измеримого воздействия. Чтение формально открыто (детектирование солнечных нейтрино [93], геонейтрино [94, 95], нейтрино pp-цепочки [96, 97], сверхновая SN 1987A [98]), но запись закрыта в обе стороны. Нейтринная гипотеза обратной связи в подсистеме звезда–планета строго отвергается.

Итог для программы. Из анализа нейтринного канала следует важный методологический вывод: поиск естественной обратной связи должен концентрироваться на каналах с существенно бóльшим сечением взаимодействия — гравитационных (приливные резонансы), электромагнитных («крылья Альфвена») и механических (сейсмические моды), рассмотренных выше. Нейтринный сектор остаётся ценным исключительно как пассивный диагностический канал для исследования внутренней структуры звезды. Гибридные нейтринно-гравитационные сценарии для компактных объектов (каскадные эффекты геонейтрино в ядерной пасте нейтронных звёзд) сохраняют статус спекулятивной гипотезы, количественная оценка которой является задачей 8.3.4; для обычных звёзд главной последовательности нейтринный канал отвергнут и не включён в гипотезу Н4.2.

4.3. Обратная связь в подсистеме «планета–биосфера»

Хотя биосферные обратные связи являются предметом отдельной обширной области науки (собственно, оригинальная гипотеза Гайи [3] и её современные версии [99, 100]), можно указать на ряд механизмов, по которым биосфера способна влиять на глубинные недра планеты, замыкая общий контур.

Ранг 1: Биогеохимическая модуляция тектоники. Биосфера через выветривание, седиментацию и субдукцию биогенных осадков изменяет состав и реологию мантии на геологических временах [101]. Это модифицирует «медленные веса» планетарной сети.

Ранг 2: Резонанс Шумана. Глобальные электромагнитные колебания в полости «поверхность Земли — ионосфера» (~7.83 Гц и гармоники), впервые предсказанные Шуманом [102], модулируются глобальной грозовой активностью, которая, в свою очередь, зависит от биосферных процессов (испарение, растительный покров). Эти колебания слабо, но измеримо влияют на магнитосферную динамику.

Ранг 3: Биогенная модуляция альбедо и климата. Через изменение состава атмосферы (кислород, метан, углекислый газ) биосфера влияет на термический режим планеты, что, в свою очередь, модулирует вязкость мантии и интенсивность конвекции на масштабах миллионов лет. Минимальная модель такой регуляции — «Маргаритковый мир» (Daisyworld) [103].

4.4. Обратная связь в подсистеме «звезда–биосфера» (опосредованно через планету)

Ранг 1: Ультрафиолетовое излучение и вспышки. Прямой мутагенный фактор, модулирующий эволюционные процессы в биосфере и, через них, геохимические циклы.

Ранг 2: Модуляция космических лучей (гипотеза Свенсмарка). Магнитная активность звезды, модулированная планетой, изменяет поток галактических космических лучей, достигающих планеты, что влияет на ионизацию атмосферы, облачность и, как следствие, на биосферные процессы. Данная связь между космическими лучами и глобальной облачностью впервые была статистически продемонстрирована Свенсмарком и Фриис-Кристенсеном [104]. Следует, однако, отметить, что связь между космическими лучами и облачностью остаётся предметом дискуссии: ряд исследований [105, 106] не обнаружил статистически значимой корреляции на определённых временных шкалах, что требует осторожности при использовании этой гипотезы в качестве компонента программы. Гипотеза Свенсмарка до сих пор вызывает

споры и остаётся высокодискуссионной: долгосрочный тренд потока галактических космических лучей с 1953 г. отсутствует, корреляция с облачностью ослабевает после 1985 г. и допускает объяснение через Эль-Ниньо, а оценки показывают, что даже 2%-ное изменение облачности практически не меняет энергетический баланс Земли. Поэтому данному каналу присвоен низкий ранг, и он не используется в численных демонстрациях настоящей работы. Недавние исследования (например, Sloan & Wolfendale, 2008) показывают слабую корреляцию. Она рассматривается как один из возможных, но маловероятных факторов, а не как основной механизм.

Следует подчеркнуть: все рассмотренные механизмы не требуют искусственной техники; они неотъемлемо присущи физике плазмы, гравитационной динамике, геохимии и биологической эволюции системы.

4.5. Направленная стабилизация системы «звезда–планета–биосфера»

В заключение рассмотрения каналов обратной связи выдвинем спекулятивную, но физически осмысленную гипотезу о трёхфазном механизме направленной стабилизации, объединяющем случайность и обратную связь.

Фаза 1: Слепое сканирование и классическая миграция. На начальном этапе система «звезда–планета» представляет собой чисто гравитационную и термодинамическую систему без обратной связи от биосферы ($R_{\text{bio}} = 0$). Орбита планеты не является строго статичной. В силу законов классической механики планета подвержена непрерывному дрейфу (миграции), который выступает в роли физического «сканирования» фазового пространства.

Это сканирование обеспечивается тремя механизмами: (а) Приливное ускорение: если звезда вращается быстрее орбитального движения планеты ($\Omega_{\text{star}} > n_{\text{planet}}$), приливный горб звезды опережает планету, передавая ей угловой момент и заставляя орбиту медленно расширяться. (б) Потеря массы звездой: звёздный ветер уносит массу, что, согласно закону сохранения углового момента ($a \propto 1/M_{\text{star}}$), приводит к вековому расширению орбиты. (в) Динамическое рассеяние: гравитационные взаимодействия с другими планетами системы вызывают хаотическую диффузию орбитальных параметров.

Направление задаётся знаком разности $\Omega_{\text{star}} - n$ (см. п. 6.11.3), сила тангенциальна, поскольку изменяет орбиту обменом угловым моментом. Вычисления, выполненные на редуцированной модели (раздел 6.11), подтверждают эту форму.

В процессе этого слепого дрейфа планета проходит через различные термальные режимы. Данный этап является физическим аналогом неконтролируемого предобучения (unsupervised pre-training), в ходе которого система естественным образом исследует доступные конфигурации.

Фаза 2: Триггер — появление пребиотической химии. Когда на планете возникает в достаточном количестве хотя бы примитивная органика или пребиотическая химия, физические свойства планеты меняются настолько, что это может быть «почувствовано» звездой через несколько каналов:

Канал 1: Изменение альбедо. При появлении органической дымки (аналог архейской Земли или Титана) альбедо планеты меняется с ~ 0.3 до $\sim 0.5\text{--}0.6$ [107, 108]. Это меняет силу радиационного давления, однако количественная оценка показывает:

1. Сила радиационного давления на Землю: $F_{\text{rad}} = (S/c) \cdot \pi R_{\oplus}^2 \approx 5.8 \times 10^8 \text{ Н}$ (с учётом альбедо $\sim 4 \times 10^8 \text{ Н}$).

2. Изменение при $\Delta A = 0.2$: $\Delta F_{\text{rad}} \approx 1.2 \times 10^8 \text{ Н}$.

3. Ускорение: $a = \Delta F/M_{\oplus} \approx 2 \times 10^{-17} \text{ м/с}^2$.

Влияние радиационного давления на орбиту определяется безразмерным параметром $\beta = F_{\text{rad}}/F_{\text{grav}} \approx 2 \times 10^{-14}$ (при $F_{\text{grav}} \approx 3.5 \times 10^{22} \text{ Н}$ для системы Солнце–Земля). Хотя это влияние не является пренебрежимо малым в абсолютных величинах ускорения, оно второстепенно по сравнению с приливными эффектами и не может служить основным драйвером миграции.

Вывод: этот канал слишком слаб для существенной миграции, но может служить триггером для более сильных механизмов.

Канал 2: Изменение чисел Лява (наиболее перспективный механизм). Появление океанов и атмосферы меняет приливный отклик планеты, однако характер этого изменения требует уточнения. Вещественная часть числа Лява k_2 определяется преимущественно упругими свойствами мантии и слабо зависит от наличия океанов: для Земли с океанами $k_2 \approx 0.30$, для Венеры без океанов $k_2 \approx 0.29\text{--}0.30$. Принципиальное влияние океаны оказывают на приливную диссипацию, описываемую мнимой частью $\text{Im}(k_2)$ или приливной добротностью Q : суммарные приливные потери Земли составляют $\sim 3.7 \text{ ТВт}$, из которых $\sim 2.4\text{--}3 \text{ ТВт}$ приходится на океаническую диссипацию. Таким образом, появление океанов увеличивает эффективность приливной связи (пропорциональной $k_2(\omega)/Q(\omega)$) примерно в 3 раза за счёт уменьшения эффективной

добротности, а не за счёт изменения самого k_2 . В режиме резонансного захватывания [75, 76, 109] это приводит к сдвигу резонансной частоты, и звезда автоматически перенастраивает свои g-моды на новую частоту. Оценка показывает, что скорость миграции может достигать $\dot{a}/a \sim 10^{-9} \text{ год}^{-1}$, что даёт смещение орбиты ~ 1 а.е. за 1 млрд лет — величина, более чем достаточная для существенной коррекции положения планеты в зоне обитаемости. Следует отметить, что эта оценка предполагает постоянство скорости миграции, что является упрощением: в реальности скорость может меняться по мере миграции планеты и изменения резонансных условий. Приведённая оценка $\dot{a}/a \sim 10^{-9} \text{ год}^{-1}$ основана на моделях резонансного захватывания для гигантских планет [75, 76, 109]. Для каменных планет земного типа скорость миграции может отличаться на порядки в зависимости от массы планеты, чисел Лява и параметров резонанса. Важно отметить, что изменение приливной диссипации в ~ 3 раза при появлении океанов может быть недостаточным для «запираания» планеты в резонансе без дополнительных механизмов. Количественная проверка этой оценки для систем типа Солнце–Земля является задачей 8.3.7.

Канал 3: Спектральные изменения. Изменение состава атмосферы меняет спектр поглощения/отражения планеты [110, 111], однако поток от планеты составляет лишь $\sim 10^{-10}$ от звёздного, что делает этот канал слишком слабым для прямой обратной связи, хотя он может служить индикатором.

Фаза 3: Замыкание контура обратной связи. Здесь возникает замкнутый контур:

1. На планете начинается пребиотическая химия → меняется атмосфера (дымка, CH_4 , океаны).
2. Меняются числа Лява → меняется приливная связь → темп миграции изменяется.
3. Если звезда находится в режиме резонансного захватывания, изменение приливного отклика планеты сдвигает резонансный аттрактор — звезда перенастраивает свои g-моды на новую частоту.
4. Перенастройка мод меняет динамо и магнитную активность звезды → меняет звёздный ветер и УФ-поток → меняет условия на планете.

Это уже замкнутый контур: планета → звезда → планета. Система может переходить из режима стохастической миграции в режим, где обратная связь через приливный отклик и резонансное захватывание обеспечивает направленную стабилизацию орбитальных параметров, а присутствие пребиотической химии (а затем и биосферы) служит триггером, запускающим этот механизм.

Подстройка планеты: многопараметрическая оптимизация. Помимо стабилизации орбиты в зоне обитаемости, планета может подстраивать ряд параметров для оптимизации условий биосферы: скорость вращения (через изменение момента инерции), осевой наклон (через квадрупольный момент и взаимодействие со спутниками), орбиты спутников (через гравитационное поле), числа Лява (через упругие свойства недр), магнитное поле (через геодинамо). Система Земля–Луна демонстрирует все эти механизмы: стабилизация осевого наклона Луной [112], замедление вращения Земли приливным взаимодействием, расширение орбиты Луны, поддержание тектоники плит приливной диссипацией. В контексте модели Триединой структуры подстройка планеты является многопараметрической оптимизацией, а не одномерной стабилизацией орбиты.

Оговорка. Данная гипотеза носит спекулятивный характер и не является центральной для программы. Её включение в текст мотивировано стремлением указать на возможное направление дальнейших исследований. Фальсификатор: отсутствие статистической связи между наличием биосферы и «благоприятными» орбитально-динамическими параметрами в больших выборках экзопланетных систем (гипотеза Н1.1, раздел 7). В отсутствие возможности прямого детектирования биосфер на экзоплантах гипотеза Н1.1 не может быть прямо фальсифицирована в текущих условиях и сохраняет статус теоретической; её проверка станет возможной лишь с появлением методов прямого биодетектирования в экзопланетных атмосферах.

Соотношение с существующей литературой. Следует подчеркнуть, что отдельные механизмы, рассмотренные выше — резонансное захватывание [75, 76, 109], частотно-зависимые числа Лява [113], влияние океанов на приливную диссипацию, биосферная обратная связь [3, 99–101], — изучались в литературе по отдельности. Настоящая работа не претендует на открытие нового физического механизма; её вклад состоит в предложении концептуальной рамки, явно связывающей эти механизмы в трёхфазную модель направленной стабилизации. В явном виде такое объединение — от пребиотической химии через изменение приливного отклика к резонансному захватыванию и обратно — в доступной литературе не обнаружено, однако это утверждение не может быть верифицировано исчерпывающим образом. Предложенная модель носит характер рабочей гипотезы, требующей количественной разработки и наблюдательной проверки.

4.5.1. Физический механизм изменения мультиквадрупольного момента звезды: механизм Апплгейта и нейросетевая гипотеза

Изменение мультиквадрупольного момента звезды требует перераспределения массы в её недрах. В настоящей работе рассматриваются два взаимодополняющих уровня описания этого процесса: физический механизм, обеспечивающий саму возможность изменения квадрупольного момента, и механизм управления, определяющий направление и интенсивность этого изменения.

Примечание о происхождении механизма. Механизм переменного квадрупольного момента был первоначально предложен и изучен для двойных звёздных систем (Applegate 1992 [114]; Lanza & Rodonò 1999 [115]). В настоящей работе проводится адаптирование этого механизма к системе звезда–планета, исходя из предположения, что физика перераспределения массы внутри звезды одинакова в обоих случаях. Двойные системы не являются целью настоящего исследования; они служат физической основой для механизма, который применяется к системе звезда–планета–биосфера.

Физическая основа: механизм Апплгейта. Механизм описывает изменение гравитационного квадрупольного момента звезды вследствие перераспределения углового момента внутри конвективной зоны, вызванного магнитной активностью. В двойных звёздных системах этот механизм проявляется как периодическая модуляция орбитального периода компаньона с периодом, близким к периоду магнитного цикла звезды [116, 117]. Количественные оценки для звёзд солнечного типа дают переменную компоненту квадрупольного момента $\Delta J_2 \sim 10^{-9} - 10^{-8}$ [114, 116].

Ограничение механизма Апплгейта. Сам по себе механизм Апплгейта обеспечивает лишь периодическую модуляцию квадрупольного момента, связанную с магнитным циклом звезды. Он не содержит механизма определения направления и интенсивности воздействия на конкретную планету и, следовательно, не может обеспечить направленную стабилизацию орбиты планеты в зоне обитаемости. Периодическая осцилляция квадрупольного момента приводит к колебаниям орбитальных параметров компаньона, но не к их целенаправленной коррекции.

Нейросетевая гипотеза: механизм управления. В дополнение к физической основе, обеспечиваемой механизмом Апплгейта, настоящая работа выдвигает гипотезу о том, что звезда функционирует как нейронная сеть в функциональном смысле (разделы 2.1, 3). В рамках этой гипотезы узлами сети являются зоны повышенной плотности в недрах звезды

(конвективные ячейки, магнитные трубки, области фазовых переходов), а весами — локальная плотность вещества в этих зонах.

Когда звезда «обрабатывает» входной сигнал от планеты — приливный потенциал, модулированный числами Лява планеты, — её нейронная сеть модифицирует веса: области с повышенной плотностью перемещаются из одной части звезды в другую. Это перемещение массы изменяет мультиквадрупольный момент звезды:

$$J_n(t) = -1/(M \cdot R^n) \cdot \int \rho(r, t) \cdot r^n \cdot P_n(\cos \theta) d^3r$$

Физически это означает, что внутренняя динамика звезды (конвекция, магнитная топология, осцилляционные моды) перераспределяет массу в соответствии с входным сигналом, используя механизм Апплгейта как инструмент перераспределения углового момента. Нейросетевая функциональность обеспечивает то, чего не может обеспечить механизм Апплгейта сам по себе: нелинейный, зависящий от истории отклик на входной сигнал от планеты. Направление изменения мультиполей не является целенаправленным выбором, а представляет собой эмерджентный результат внутренней динамики звезды, определяемой уравнениями магнитной гидродинамики, конвекции и осцилляций при заданных граничных условиях (приливной потенциал, модулированный числами Лява планеты). Аналогия: термостат не «решает» включить обогреватель — он реагирует на температуру согласно своей конструкции; поддержание температуры является эмерджентным свойством системы, а не целенаправленным выбором. Аналогично, стабилизация орбиты планеты в зоне обитаемости является эмерджентным результатом нелинейной динамики системы «звезда–планета–биосфера», а не следствием какого-либо «решения» или «намерения» со стороны звезды.

Критическая оговорка об эмерджентности. Важно подчеркнуть, что в предлагаемой модели нет места телеологии. Звезда не «стремится» стабилизировать орбиту планеты. Стабилизация возникает как эмерджентное свойство системы с обратной связью: конфигурации, в которых обратная связь через числа Лява и мультиквадрупольный момент приводит к удержанию планеты в зоне обитаемости, сохраняются на геологических временах; конфигурации, в которых обратная связь ведёт к дестабилизации, элиминируются вместе с планетой или биосферой. Это процесс селективного удержания, аналогичный естественному отбору, но действующий на уровне планетных систем. Нейросетевая функциональность обеспечивает механизм этого селективного удержания (нелинейный отклик, память, пластичность), но не цель.

Роль биосферы: сигнал качества. Ключевым элементом модели является зависимость чисел Лява планеты от состояния биосферы. Появление океанов увеличивает приливную диссипацию (пропорциональную $k_2(\omega)/Q(\omega)$) примерно в 3 раза за счёт уменьшения эффективной добротности, при этом само вещественное число Лява k_2 остаётся практически неизменным [113], а биосферные процессы (состав атмосферы, альбедо, биогеохимические циклы) модулируют приливной отклик планеты на масштабах миллионов лет. Таким образом, биосфера обеспечивает сигнал качества R в уравнении обучения (2): изменение чисел Лява модулирует входной сигнал от планеты к звезде, что, в свою очередь, определяет направление и интенсивность модификации мультиквадрупольного момента звезды.

Совмещение механизмов. Таким образом, полная цепочка механизма выглядит следующим образом:

1. Входной сигнал: планета создаёт приливный потенциал, модулированный числами Лява, которые зависят от состояния биосферы.
2. Обработка: входной сигнал от планеты модулирует внутреннюю динамику звезды через приливное взаимодействие, модифицируя веса (локальную плотность вещества) в соответствии с задачей стабилизации.
3. Физическая реализация: перераспределение массы осуществляется через механизм Апплгейта (магнитная активность, перераспределение углового момента в конвективной зоне) и связанные с ним процессы (конвекция, осцилляционные моды).
4. Выходной сигнал: изменение мультиквадрупольного момента создаёт переменное гравитационное поле, которое через резонансную селективность воздействует на конкретную планету.
5. Обратная связь: изменение орбитальных параметров планеты модулирует приливный потенциал, замыкая контур обратной связи.

Локальная физическая основа механизма Апплгейта (МГД-перераспределение). В оригинальной формулировке (Applegate, 1992) механизм переменного квадрупольного момента рассматривается как глобальный процесс перераспределения углового момента во всей конвективной зоне звезды. Однако для функционирования нейросетевой модели, состоящей из множества локальных узлов (конвективных ячеек и магнитных трубок), этот глобальный механизм должен быть декомпозирован на локальные магнитогидродинамические (МГД) процессы.

Физическая цепочка локального отклика выглядит следующим образом:

1. Локальный входной сигнал: приливной потенциал планеты создаёт в конвективной зоне звезды локальные периодические сдвиговые течения.

2. Локальное усиление магнитного поля (обновление веса): в тех конвективных ячейках, где частота приливного воздействия резонирует с локальными частотами (конвективным оборотом или альфвеновскими волнами), сдвиговые течения через локальный индукционный эффект (локальное динамо) усиливают магнитное поле B_i . Локальная плотность магнитной энергии $w_i = B_i^2/(8\pi)$ возрастает, что в терминах нейросети эквивалентно увеличению веса узла w_i .

3. Локальное смещение массы (магнитная плавучесть): усиление локального магнитного поля увеличивает магнитное давление внутри ячейки. Для сохранения баланса с внешним газовым давлением плотность плазмы в ячейке падает, и возникает сила Архимеда (неустойчивость Паркера), заставляющая данную магнитную трубку или ячейку смещаться в радиальном или широтном направлении на величину Δr_i . Одновременно локальное магнитное поле через напряжение Максвелла перераспределяет угловой момент между соседними ячейками.

4. Эмерджентный глобальный отклик: глобальное изменение квадрупольного момента звезды ΔJ_2 не является отдельным физическим актом, а представляет собой макроскопическую сумму (интеграл) миллионов таких локальных смещений Δr_i и локальных изменений углового момента, когерентно организованных нейросетевой топологией магнитных связей.

Такой подход снимает энергетическую проблему: планете не требуется передавать звезде колоссальную энергию для глобального перераспределения масс. Планета выступает лишь как слабый, но когерентный параметрический драйвер, который через локальные резонансы направляет уже существующую энергию звёздной конвекции в нужную пространственную гармонику.

Критическая оговорка. Механизм Апплгейта [114] является одной из гипотез, объясняющих вариации орбитальных периодов в двойных звёздных системах. Хотя механизм имеет теоретическое обоснование и поддерживается некоторыми наблюдениями [115, 116], его применимость не универсальна: работы Völschow et al. (2016, 2018) [117] показали, что в ряде систем энергия, требуемая для изменения квадрупольного момента, превышает доступную энергию магнитной активности. Существуют альтернативные объяснения, включая присутствие третьего тела [118]. В настоящей работе механизм Апплгейта используется как физически обоснованная возможность изменения квадрупольного момента, не утверждая его универсальности. Нейросетевая

функциональность звёзд является гипотезой, требующей количественной проверки (задачи 8.3.8, 8.3.9). Совмещение этих двух компонентов в единую модель направленной стабилизации является оригинальным вкладом настоящей работы и не имеет прямых аналогов в существующей литературе. Количественная оценка достаточности механизма для стабилизации орбиты планеты в зоне обитаемости является задачей будущих исследований.

Также стоит отметить, что механизм Апплгейта (модуляция квадрупольного момента звезды магнитными трубками) в квазистатическом пределе вырождается ($d\Phi=0$), и его вековой вклад в орбитальную миграцию пренебрежимо мал. Однако его роль не сводится к нулю:

- (а) он является физическим носителем "записи" информации планеты в звезду;
- (б) обеспечивает когерентное усиление слабого планетарного драйвера через фазировку по ансамблю трубок;
- (в) порождает наблюдаемые сигнатуры — орбитально-фазированную модуляцию периода и астросейсмические сдвиги;
- (г) его нулевой вековой эффект разрешает "парадокс перестаблизации", оставляя окно стабилизации открытым;
- (д) в динамических прогонах он служит зондом фазовой динамики резервуара.

4.5.2. Иллюстрирующий пример: система Солнце–Земля–Луна

В качестве иллюстрирующего примера можно рассмотреть текущую конфигурацию системы Солнце–Земля–Луна. Ряд её параметров выглядит подозрительно «удобным» для поддержания стабильной биосферы:

1. Стабилизация оси вращения Земли Луной. Наклон оси Земли ($\sim 23.5^\circ$) стабилизируется гравитационным моментом Луны, что предотвращает хаотические вариации наклона (которые наблюдаются, например, у Марса, не имеющего крупного спутника) и обеспечивает стабильность сезонов на масштабах миллиардов лет [112].

2. Приливная синхронизация и диссипация. Приливное взаимодействие с Луной обеспечивает постоянную диссипацию энергии в недрах Земли, поддерживая конвекцию в мантии и, как следствие, тектонику плит — ключевой механизм долгосрочной регуляции углеродного цикла.

3. Резонансные частоты. Текущие параметры орбитальной системы создают спектр приливных частот, который резонансно взаимодействует с собственными модами земного ядра и мантии, потенциально поддерживая геодинамо в активном состоянии.

4. Океаны и числа Лява. Появление океанов практически не меняет вещественную часть числа Лява ($k_2 \approx 0.30$ как для Земли с океанами, так и для безводных силикатных планет [113]). Однако океаны радикально увеличивают мнимую часть (приливную диссипацию, $\text{Im}(k_2)$), снижая эффективную добротность Q . Это увеличивает фактор приливной диссипации k_2/Q примерно в 3–10 раз, что критически важно для резонансного захватывания.

Следует подчеркнуть, что приведённые совпадения могут быть полностью объяснены стандартными физическими механизмами и антропным отбором (мы наблюдаем именно такую систему, потому что в других не возник наблюдатель). Трёхфазная модель предлагается лишь как дополнительная интерпретационная рамка, не претендующая на исключительность. Тестирование этой гипотезы требует сравнительного анализа экзопланетных систем (см. раздел 7).

4.5.3. Триггерное усиление: закрытие энергетического разрыва

Принципиальное различие между сигналом и резервуаром меняет постановку энергетического возражения. Солнечная вспышка высвобождает 10^{25} – 10^{26} Дж при триггере в 10^{15} – 10^{16} Дж: энергия берётся из накопленной свободной магнитной энергии, триггер лишь выбирает момент и канал высвобождения. Механизм Апплгейта устроен аналогично: резервуаром служит вращательная энергия звезды ($E_{\text{rot}} \sim 10^{36}$ Дж для быстрого К-карлика), а приливный и альфвеновский сигналы планеты обеспечивают фазовую когерентность перераспределения. Возражение Марша–Прингла, таким образом, ограничивает не возможность сигнала, а устойчивый темп перезарядки резервуара ($\Delta E/E_{\text{sec}} < 1$ по Lanza 2006 [116]; осуществимость в 4 из 16 систем по Völschow et al. 2016 [117]).

Таблица 4.5.1 систематизирует известные и гипотетические механизмы усиления триггерного отклика с указанием канала, на который каждый действует. Композиция усилений корректна только внутри одного канала: резонансная фиксация g-мод и многомодовая параметрическая неустойчивость усиливают приливный момент (миграционный канал, 10^2 – 10^3); инверсный каскад квазидвумерной турбулентности, захват тахоклинных нелинейных осцилляций и когерентность SOC-лавины — крупномасштабный квадрупольный отклик (консервативная база 10^2 – 10^4 с учётом нелинейного насыщения); рекомбинационные триггеры — корональную активность (климатический канал). Произведение по всем каналам (до 10^8) приводится лишь как

верхняя граница при допущении независимости и межканальной фазовой когерентности. Спорные механизмы (ядерное усиление Уолффа–Патроне, нелокальный транспорт через тахоклин) из базовой оценки исключены.

Таблица 4.5.1. Механизмы триггерного усиления и их поканальная принадлежность.

№	Механизм	Статус	Усиление (до насыщения)	Усиливаемый канал
1	Тахоклин как бифуркационный слой	Известен (критичность); связь с крыльями спекулятивна	$10^2\text{--}10^4$	Квадрупольный (перераспределение массы)
2	Резонансная фиксация g-мод	Измерен (спутники Сатурна; снижение Q' в двойных)	$10^2\text{--}10^3$	Миграционный (приливный момент, κ)
3	Многомодовая параметрическая неустойчивость	Теория (2024–2025)	10^3	Диссипация/миграция
4	Инверсный каскад квази-2D турбулентности	Известен	$10^1\text{--}10^2$	Квадрупольный (крупномасштабные потоки)
5	Ядерное усиление Уолффа–Патроне	Спорно (критиковано); исключено из базовой оценки	10^6	Ядро/светимость
6	Тахоклинные нелинейные осцилляции + injection locking	Известны в моделях динамо	$10^1\text{--}10^3$	Квадруполь/динамо
7	Swing-усиление альфвеновских волн	Теория	$10^1\text{--}10^3$	Волновой канал
8	Рекомбинация как триггер	Измерен в короне (вспышки, MSPI-пятна)	$10^{10}\text{--}10^{14}$ (темпы высвобождения)	Активность (УФ/ветер), не J_2
9	SOC-лавины магнитных канатов	Гипотеза (степенная статистика вспышек)	$10^4\text{--}10^8$	Квадруполь (когерентность ансамбля)
10	Топологическое (гелиситетное) усиление	Гипотеза	$10^3\text{--}10^6$	Квадруполь
11	Когерентное магнотное (мазерное) усиление	Гипотеза	$10^4\text{--}10^8$	Спекулятивный
12	Нелокальный транспорт через тахоклин	Гипотеза (аналог в токамаках)	Снятие экспоненциального затухания	Связь поверхность–тахоклин
13	Спин-орбитальная комменсурабельность	Селекционный эффект	Когерентное накопление	Все каналы (фаза)

Следствие для модели: безразмерный коэффициент γ в редуцированных демонстрациях (разделы 6.11.7, 6.11.12) интерпретируется как зонд поканального усиления: $\gamma=1$ соответствует

прямому механизму Апплгейта без усиления; $\gamma=10^4$ — верхней границе консервативной базы квадрупольного канала (10^2 – 10^4); $\gamma=10^6$ — области за пределами произведений известных механизмов, где модель предсказывает режим избыточной стабилизации (орбитальную ловушку с подавлением биосферы, Рис. 2). Устойчивый верхний предел γ_{eff} системы задаётся темпом перезарядки резервуара, а не физикой триггера; системы, превышающие его, должны демонстрировать подавление, а не удержание обитаемости. Дополнительное популяционное предсказание: низшие спин-орбитальные комменсурабельности (механизм 13) выступают отборочным условием когерентного накопления, следовательно сигнатуры направленной стабилизации (задача 8.2.7) должны концентрироваться в системах с малыми целыми отношениями $P_{\text{rot}}/P_{\text{orb}}$ и плотным спектром g-мод.

Установив физическую основу обратной связи и механизмы её усиления, далее перейдём к роли биосферы как особого «правила пластичности» системы.

4.6. Метаканалы: модуляция граничных условий и параметров резервуара

Помимо прямых и обратных каналов связи, описывающих передачу энергии и вещества между элементами системы «звезда–планета–биосфера», существует особый класс каналов, которые мы называем **метаканалами** (metachannels). Метаканал — это канал связи, который изменяет не состояние системы, а её **параметры** или **граничные условия**, тем самым модифицируя саму динамику резервуара. В отличие от классических каналов связи, описывающих обмен энергией, веществом или импульсом между подсистемами, метаканалы определяют влияние одной подсистемы на *фундаментальные параметры* или *граничные условия* другой. В терминологии теории резервуарных вычислений (reservoir computing), если обычные каналы передают сигналы на вход или снимают их с выхода резервуара, то метаканалы эквивалентны адаптации самой внутренней динамики резервуара (его матрицы связности, времен релаксации или функций активации) в процессе обучения без учителя.

Метаканалы реализуют принцип **направленной стабилизации** (directed stabilization): система не просто пассивно демпфирует возмущения, но активно перестраивает свою диссипативную архитектуру так, чтобы минимизировать производство энтропии в долгосрочной перспективе. Это и есть физический субстрат «обучения» в нашей модели.

В рамках Триединой структуры можно идентифицировать 12 ключевых метаканалов (6 прямых и 6 обратных), которые обеспечивают долгосрочную направленную стабилизацию системы «звезда–планета–биосфера».

Прямые метаканалы (Биосфера → Параметры планеты):

1. **Метаканал вязкости мантии (Биотическое выветривание → Q и k_2):** Биосфера ускоряет силикатное выветривание, увеличивая поток воды в мантию через субдукцию. Вода снижает эффективную вязкость оливина через префактор фугитивности $f_{H_2O}^r$ (а не через энергию активации), модулируя добротность приливной диссипации Q и число Лява k_2 [Hirth & Kohlstedt, 2003]. Это меняет диссипативный отклик планеты на приливные силы (реализовано в уравнениях 6.4.1).
2. **Метаканал тектонического режима (Климат → Режим литосферы):** Наличие жидкой воды и биогенных смазок определяет переход от режима «застойной крышки» (stagnant lid) к режиму подвижных плит, кардинально меняя тепловой поток и дегазацию [Sleep & Bird, 2007].
3. **Метаканал геохимического стока (Биота → τ_{CO_2}):** Биогенное осаждение карбонатов и органического углерода изменяет характерное время вывода CO_2 из атмосферы, перенастраивая термостат силикатного выветривания [Schwartzman & Volk, 1989; Lenton & von Bloh, 2001].
4. **Метаканал альбедо (Биота → α_{bio}):** Формирование биомов (лесов, фитопланктона) напрямую изменяет планетарное альбедо, модифицируя радиационный баланс [von Bloh & Franck, 2003].
5. **Метаканал ядра (Седиментация → Тепловой поток СМВ):** Субдукция органического углерода влияет на тепловой поток через границу ядро–мантия, модулируя работу геодинамо и магнитную защиту [Höning, 2020].
6. **Метаканал атмосферной химии (Биота → CH_4 , O_2):** Генерация биогенных газов меняет оптическую толщину атмосферы и её химический потенциал [Arens & Kleidon, 2011].

Обратные метаканалы (Параметры звезды/орбиты → Биосфера):

1. **Метаканал инсоляции (Эволюция $L(t)$ → T_{opt}):** Медленное увеличение светимости звезды требует от биосферы сдвига оптимума температур или адаптации альбедо.
2. **Метаканал приливного нагрева ($e(t)$, $a(t)$ → F_{tidal}):** Изменение орбиты модулирует эндогенный тепловой поток, влияя на гидротермальную активность и хемосинтез.

3. **Метаканал магнитного щита (Динамо → УФ/Рентген на поверхности):** Модуляция магнитного поля планеты изменяет поток ионизирующего излучения, достигающего поверхности, что влияет на мутагенез и глубину обитаемой зоны.
4. **Метаканал прецессии (Миланкович → Сезонность):** Изменение параметров орбиты (e , ω , Ω) модулирует сезонные градиенты, заставляя биосферу адаптировать стратегии миграции и спячки.
5. **Метаканал звездного ветра (Магнитосфера → Эрозия атмосферы):** Звездный ветер и корональные выбросы массы (СМЕ) определяют темпы потери атмосферы, ограничивая время жизни биосферы.
6. **Метаканал резонансных мод (Звездные осцилляции → Климатические циклы):** Связь собственных мод звезды с орбитальными частотами (через механизм Апплгейта) может создавать долгопериодические климатические циклы, к которым биосфера должна адаптироваться.

Связь с вычислительной реализацией: Метаканалы явно реализованы в расчётной модели (раздел 6.4.1, уравнения для $k_2(\omega;t)$ и $Q_j(\omega;t)$; задача 8.3.7 по резонансному захвату; задача 8.3.13 по SNR биогенного выветривания). В квазистатическом режиме ($q_{\text{static}}=\text{True}$) фазовый канал Апплгейта вырождается ($d\Phi=0$), но метаканальный вклад через k_2/Q остаётся, что объясняет наблюдаемую в модели слабую орбитальную миграцию ($\Delta a \sim \mu AU$) при значительной климатической стабилизации ($\Delta T \sim 1,5 K$).

Нулевой результат как предсказание: Модель предсказывает, что вековая орбитальная миграция через канал Апплгейта пренебрежимо мала, что согласуется с отсутствием наблюдаемых «орбитальных ловушек» в экзопланетных системах. Стабилизация реализуется через климатические метаканалы, а не через прямое изменение орбиты.

Именно наличие метаканалов отличает Триединую структуру от классических моделей геологического углеродного цикла. Система не просто пассивно демпфирует возмущения, но активно перестраивает свою диссипативную архитектуру, минимизируя производство энтропии в долгосрочной перспективе.

5. Биосфера как правило пластичности

В терминах уравнения (2) гипотеза Гайи [3] утверждает, что при наличии биосферы правило модификации **G** приобретает нетривиальный сигнал качества **R**: конфигурации среды стабилизируются под воздействием сигналов, порождаемых самой биосферой через её макропроявления [99, 100]. Формально это означает, что биосфера превращает планетарную систему из диссипативной среды, лишь релаксирующей к локальным минимумам свободной энергии, в систему, способную к направленному изменению своих медленных переменных **w** под воздействием сигнала, порождаемого самой средой.

Физическая природа сигнала качества **R**

В контексте биосферы сигнал **R** не является внешним «учителем», задающим явные целевые значения, как в задаче обучения с учителем. В терминах машинного обучения это соответствует не учителю, задающему желаемый выход, а функции награды в обучении с подкреплением: биосфера поставяет скалярную оценку персистентности, а модификация медленных переменных осуществляется физической контрастивной пластичностью и последовательным отбором (подраздел 6.0.6). Скорее, биосфера выступает в роли «глобального триггера»: через свои макропроявления — состав атмосферы, альbedo, биогеохимические циклы — она стимулирует систему модифицировать медленные переменные для обеспечения дальнейшего развития самой биосферы. В терминах теории управления это ближе к обучению с подкреплением, где «функцией вознаграждения» является стабильность условий обитания, а «средой» — планетарная физико-химическая система.

Конкретные механизмы реализации **R**

Несколько хорошо изученных геохимических и биогеохимических циклов демонстрируют, как биосфера реализует правило модификации **G** на практике:

1. Карбонатно-силикатный цикл (термостат выветривания). Скорость химического выветривания силикатных пород зависит от температуры и концентрации CO_2 . Биота (корневые системы растений, микробные биоплёнки, лишайники) ускоряет выветривание на порядки по сравнению с абиотическим процессом [139]. Это создаёт отрицательную обратную связь: потепление → усиление выветривания → снижение CO_2 → охлаждение. Биосфера выступает здесь как активный элемент правила **G**, модифицирующего медленную переменную (концентрацию парниковых газов) в направлении стабилизации температуры [101].

2. Великое кислородное событие (~2.4 млрд лет назад). Появление оксигенного фотосинтеза радикально изменило окислительно-восстановительный потенциал атмосферы и океана, что привело к глобальной перестройке геохимических циклов, изменению реологии мантии через окисление железа и, возможно, к инициации современной тектоники плит. Это пример того, как биосфера однократно и необратимо модифицирует **W** планетарной системы, переводя её в качественно новый режим функционирования.

3. Модель Маргаритковый мир [103]. Минимальная модель, демонстрирующая, как два вида маргариток (тёмные и светлые) с разной альбедо способны стабилизировать глобальную температуру планеты в диапазоне, благоприятном для их собственного выживания, без какого-либо централизованного управления. Это простейшая реализация уравнения (2) с нетривиальным **R** в чисто биологической системе.

Связь с трёхфазной моделью (раздел 4.5)

В контексте трёхфазной модели направленной стабилизации роль биосферы как правила пластичности становится особенно наглядной:

1. Фаза 1 (до биосферы): **R** тривиален или отсутствует. Система релаксирует, подчиняясь стохастической динамике. Планета не обладает механизмом направленной модификации **W**.

2. Фаза 2 (пребиотическая химия): **R** начинает формироваться. Автокаталитические циклы [19] создают первые зачатки селекции: молекулярные ансамбли, стабилизирующие локальную среду, получают преимущество в репликации. Это переходный режим, в котором система ещё не обладает полноценным правилом **G**, но уже демонстрирует признаки направленной динамики.

3. Фаза 3 (биосфера): **R** полностью операционален. Биосфера в целом функционирует как распределённое правило модификации **G**, действующее на масштабах от микроскопических (микробные маты) до планетарных (углеродный цикл, альбедо).

Обязательная критика

Сильная Гайя (биосфера оптимизирует планетарные условия для себя) является неверифицируемой и, вероятно, ложной [119, 120]. Слабая коэволюционная Гайя (биосфера и геосфера коэволюционируют с измеримыми обратными связями) подтверждаема. Эволюционная интерпретация Гайи рассмотрена в [121]. Не развивая здесь теорию биосферных связей — это предмет отдельной обширной области — можно указать лишь, что биосфера предоставляет системе

«звезда–планета» нетривиальный R , превращающий релаксацию в обучение в смысле уравнения (2). Принципиально важно, что это утверждение не является виталистическим: оно не постулирует наличие цели, сознания или интенциональности, а лишь констатирует, что наличие биосферы создаёт в системе сигнал, формально эквивалентный тому, который в теории обучения называется «учителем» или «функцией вознаграждения».

5.1. Биосфера как резервуар: от триггера к считывателю

В редуцированных демонстрациях (разделы 6.11.4, 6.11.11) сигнал качества вводится как функция интегральной биомассы (кинематическая сигмоида от g_p либо $V/(V+K)$ при живой двухуровневой биосфере). Это нулевое приближение более общего утверждения: биосфера сама является физическим резервуаром в смысле раздела 2.2. Трофическая сеть микробного сообщества — рекуррентный граф с циклами (гильдия A потребляет продукт гильдии B , B — продукт C , C — продукт A), функционально изоморфный матрице W_{res} ; фазовые переходы сообщества при изменении температуры, pH и редокс-потенциала соответствуют пороговой динамике вблизи границы хаоса; споры, биоплёнки и рефугии обеспечивают затухающую память без обучения весов (режим эхо-состояния); биогеохимический выход (потoki CO_2 , O_2 , CH_4) есть суперпозиция метаболизмов всех гильдий, то есть естественный выходной слой. В этой рамке триггер R_{bio} теряет феноменологический статус: планетарные каналы (множитель выветривания, альбедо, газовые потоки, проводимость Педерсена Σ_p) управляются не интегральной биомассой, а выходом биосферного резервуара — составом сообщества, — и «триггер» становится эмерджентным свойством динамики резервуара. Триединная структура тем самым замыкается как три связанных резервуара (звезда, планета, биосфера), соответствуя исходной экспертной архитектуре (разделы 6.12–6.14), а условие непрерывности затравки (раздел 6.11.11, условие iii) получает субстрат: рефугии одновременно являются носителем памяти биосферного резервуара. Переформулировка даёт лабораторно тестируемое предсказание (Н2.7, задача 8.1.3): микробные консорциумы с рекуррентной трофической структурой должны демонстрировать измеримые резервуарные метрики — эхо-состояние, разделение, ёмкость памяти, — тогда как контрольные консорциумы без рекуррентных связей нет.

Сформулировав концептуальную основу и роль биосферы в ней, далее можно перейти к конкретным проверяемым гипотезам.

6. Математическая модель Триединой структуры

6.0. Теоретическое обоснование: отображение физики недр на формализм резервуарных вычислений

Прежде чем переходить к уравнениям, необходимо дать строгое теоретическое обоснование того, почему сплошная проводящая среда (конвективная зона звезды, жидкое ядро планеты) может рассматриваться как нейронная сеть в формальном смысле теории резервуарных вычислений (Reservoir Computing, RC). Это защищает модель от критики о неправомерном переносе биологических метафор на физические объекты.

6.0.1. Уравнения анэластической МГД как основа резервуара

В анэластическом приближении (фильтрация акустических мод, допущение о малом числе Маха $M \ll 1$) уравнения МГД для конвективной зоны звезды или внешнего ядра планеты в сферических координатах принимают вид, допускающий сильную стратификацию плотности:

$$\partial(\rho_0 u)/\partial t + \nabla \cdot (\rho_0 u \otimes u) = -\nabla p' + \rho_0(g/c_p)s'\hat{r} + (1/\mu_0)(\nabla \times B) \times B$$

$$\partial B/\partial t = \nabla \times (u \times B) - \nabla \times (\eta \nabla \times B)$$

$$\rho_0 T_0 (\partial s'/\partial t + u \cdot \nabla s') = \nabla \cdot (K \nabla T') + Q + (\eta/\mu_0) |\nabla \times B|^2$$

$$\nabla \cdot (\rho_0 u) = 0, \nabla \cdot B = 0$$

где $\rho_0(r)$, $T_0(r)$ — фоновые профили плотности и температуры, меняющиеся на несколько порядков по глубине; s' , p' , T' — возмущения энтропии, давления и температуры; η — магнитная диффузность; K — теплопроводность. Уравнение неразрывности $\nabla \cdot (\rho_0 u) = 0$ является математическим выражением анэластического фильтра, отсекающего быстрые акустические волны и оставляющего только медленные конвективные и магнитные моды, которые и формируют «узлы» и «веса» физического резервуара.

Примечание: в контексте гидродинамики стратифицированных сред термин «анэластическое» означает фильтрацию акустических мод при сохранении фонового профиля плотности $\rho_0(r)$ (Gough 1969), и не следует путать его с анэластичностью (неупругостью) в физике твёрдого тела.

6.0.2. Фурье-Галёркинское усечение и система Лоренца

Следуя методу Зальцмана–Лоренца, разложим возмущения в ряд Фурье по горизонтальным модам:

$$u(r, t) = \sum_m U_m(r, t) \cdot \exp(ik_m \cdot r_{\perp}); s'(r, t) = \sum_m S_m(r, t) \cdot \exp(ik_m \cdot r_{\perp}); B(r, t) = \sum_m B_m(r, t) \cdot \exp(ik_m \cdot r_{\perp})$$

После проектирования на базисные функции и радиального интегрирования получаем систему ОДУ для амплитуд мод:

$$\dot{x}(t) = F(x(t)) + W_{in} \cdot u(t)$$

где $x \in \mathbb{R}^N$ — вектор амплитуд мод, $N = 3N_m$ (по 3 компоненты на моду), F — нелинейная функция (квадратичные взаимодействия мод), W_{in} — матрица входного инжектирования.

Минимальное усечение (3 моды) даёт классическую систему Лоренца:

$$\dot{X} = \sigma(Y - X) + u(t); \dot{Y} = rX - Y - XZ; \dot{Z} = XY - bZ$$

где $r = Ra/Ra_c$ — надкритическое число Рэлея, $\sigma = Pr$, r , $b = 8/3$ — геометрический фактор. Расширенное усечение (N мод) даёт обобщённую систему Лоренца с квадратичными связями между модами:

$$\dot{X}_n = \sigma(Y_n - X_n) + \sum_{p,k} C_{npk}^{(1)} X_p Z_k + u_n(t)$$

$$\dot{Y}_n = r_n X_n - Y_n - \sum_{p,k} C_{npk}^{(2)} X_p Z_k$$

$$\dot{Z}_n = \sum_{p,k} C_{npk}^{(3)} X_p Y_k - b_n Z_n$$

6.0.3. Формальное отображение на резервуарные вычисления

Резервуарная машина в смысле Jaeger (2001) / Maass (2002) определяется тройкой (W_{in} , $\hat{W}$, W_{out}) и обновляется по правилу:

$$x(t + \Delta t) = (1 - \alpha) \cdot x(t) + \alpha \cdot \tanh(W_{in} \cdot u(t) + \hat{W} \cdot x(t)); y(t) = W_{out} \cdot x(t)$$

Таблица 6.0.1. Соответствие: RC ↔ физическая система.

Резервуар (RC)	Звёздная конвекция / ядро планеты (МГД)
Узлы резервуара	Фурье-моды конвективных ячеек / столбы Тейлора
Веса $\hat{W}_{ij}$	Коэффициенты нелинейного взаимодействия мод C_{npk}

Входные веса W_{in}	Внешнее возмущение (приливной потенциал, магнитный поток)
Функция активации $\tanh$	Нелинейность адвективного члена $(u \cdot \nabla)u$ и силы Лоренца
Выходной слой W_{out}	Линейная комбинация наблюдаемых мод (мультиполи J_n)
Спектральный радиус $\rho(\hat{W})$	Максимальный показатель Ляпунова λ_{max} конвективной системы
Скорость утечки α	Отношение вязкостного времени к времени сноса (обратно пропорционально Rm)

Ключевое отличие от классического RC: в стандартном RC матрица $\hat{W}$ выбирается случайно и фиксируется. В физическом резервуаре $\hat{W}$ детерминирована физикой — коэффициенты C_{prk} определяются правилами тригонометрического умножения Фурье-мод.

6.0.4. Свойство эхо-состояния (ESP) и граница хаоса

Система обладает свойством эхо-состояния (Echo State Property), если для любой пары начальных условий $x(0)$, $\tilde{x}(0)$ и любого входного сигнала $u(t)$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - \tilde{x}(t)\| = 0$$

Для обобщённой системы Лоренца это эквивалентно отрицательности максимального условного показателя Ляпунова (CMLLE):

$$\lambda_{max}^{cond} < 0 \Rightarrow ESP \text{ выполнено}$$

Гипотеза: в полном звёздном/планетарном конвективном резервуаре существует критическое значение надкритичности r_c , при котором система находится на границе хаоса (edge of chaos), где $\lambda_{max} \approx 0$. Именно в этом режиме вычислительная способность максимальна.

Таблица 6.0.2. Режимы резервуара.

$r = Ra/Ra_c$	Режим	λ_{max}	RC-свойство
$r < 1$	Нет конвекции	$\lambda < 0$	ESP, но низкая нелинейность
$1 < r < r_{Hopf}$	Стационарная конвекция	$\lambda < 0$	ESP, умеренная нелинейность
$r \approx r_{Hopf}$	Граница хаоса	$\lambda \approx 0$	Оптимальный RC
$r \gg r_{Hopf}$	Турбулентная конвекция	$\lambda > 0$	ESP нарушен

Эмпирическим подтверждением того, что турбулентная конвективная среда удовлетворяет свойству эхо-состояния и разделения на практике, служит реализация резервуарных вычислений на конвекции Рэлея–Бенара [30].

6.0.5. Объём памяти и свойство разделения

Память резервуара измеряется через задачу восстановления задержанного входа:

$$MC_k = cov^2(u(t-k), y_k(t)) / (\sigma^2(u) \cdot \sigma^2(y_k)); MC = \sum_{k=1}^{k_{\max}} MC_k$$

Для N-модового резервуара ожидается $MC \propto N$ (больше мод — больше памяти), что согласуется с теорией глубоких резервуаров.

Свойство разделения (Separation Property): для любых двух различных входов $u_1 \neq u_2$ существует момент времени τ такой, что:

$$\|x^{(u_1)}(\tau) - x^{(u_2)}(\tau)\| \geq \delta > 0$$

Для обобщённой системы Лоренца разделение обеспечивается нелинейной связью мод через члены $X_p Z_k$, $X_p Y_k$. Чем больше мод N , тем выше размерность фазового пространства и тем лучше разделение.

6.0.6. Автономное и контрастивное физическое обучение: биосфера как награда, а не учитель.

Эксперименты на пассивных резисторных сетях [27] показывают, что физическая среда обучается отображению вход–выход без внешнего процессора, минимизируя диссипацию; правило обновления в таких экспериментах контрастивно: каждое ребро сравнивает собственное падение напряжения в свободном и зажатом состояниях, причём зажатое состояние задаётся внешним учителем. Прямой перенос этой схемы на звезду некорректен: внешнего учителя нет. Однако контрастная структура воспроизводится в системе звезда–планета–биосфера в форме, где роль зажатого состояния играет конфигурация с биосферой: биосфера через метаканалы (биотическое выветривание → субдукционная вода → вязкость мантии → числа Лява k_2/Q ; климат → тектонический режим; ионосферно-магнитосферная связь) изменяет граничные условия приливной задачи, то есть задаёт «желаемый» диссипативный режим изнутри системы.

В отличие от классических резервуарных вычислений с внешним обучаемым считывателем [Jaeger 2001] или контрастивного хеббовского обучения с явным учителем [Dillavou et al. 2022], настоящая модель ближе к обучению с подкреплением (reinforcement learning): биосфера

не задаёт 'желаемую орбиту' или 'желаемый профиль конвекции', а создаёт скалярный сигнал качества (устойчивость биосферных условий), который модифицирует медленные переменные системы через физические каналы обратной связи. Это реализуется через последовательный отбор (sequential selection [Lenton et al. 1998]): конфигурации, случайно обеспечивающие стабильность биосферы, сохраняются на геологических временах; дестабилизирующие конфигурации элиминируются. Биосфера выступает не как внешний учитель, а как часть системы, модифицирующая внутренние параметры резервуара (числа Лява, вязкость мантии, альбедо) через документированные физические каналы: биотическое усиление выветривания → субдукция воды → снижение вязкости мантии → модификация k_2/Q [Höning et al. 2014]. Настоящая модель опирается на концепцию автономной физической адаптации (habituation and novelty response). Появление биосферы (например, океанов) радикально меняет приливной отклик планеты, что создает для недр звезды и мантии планеты сигнал «новизны» — резкий пик локальной приливной диссипации D . Медленные переменные системы (вязкость, магнитная топология) эволюционируют по правилу градиентного спуска $dw/dt = -\eta \nabla_w D$, минимизируя диссипацию (принцип Онсагера). Когда система структурно адаптируется к новому резонансу, диссипация падает, и система «привыкает» (веса замораживаются). Таким образом, биосфера выступает не как внешний учитель, задающий целевые значения, а как источник термодинамического градиента, направляющего физическую релаксацию в русло направленной стабилизации.

В терминах машинного обучения описанная динамика соответствует обучению с подкреплением без внешнего агента: биосфера поставяет скалярную награду (меру собственной персистентности), политика реализована физическим правилом пластичности (градиент диссипации), а скорость обучения модулируется сигналом новизны — избыточной диссипацией относительно привыкшего минимума (привыкание = обнуление ошибки предсказания награды). В отличие от контрастивного обучения с внешним зажимом [27, 28], зажатое состояние здесь формируется внутренне: граничные условия биосферы (океаны, выветривание, альбедо) играют роль сигнала обучения, не требуя внешнего вычислителя.

6.1. Переменные состояния

Все переменные состояния, включаемые в модель, должны удовлетворять критерию модулируемости:

$$\sum_k (|\partial C_{j,k}/\partial x_i| \cdot \delta x_i / \sigma_k)^2 > 1$$

где суммирование идёт по всем параметрам канала обратной связи (амплитуда A , частота ω , фаза ϕ), δx_i — характерное изменение переменной, σ_k — уровень шума канала.

Звезда (глобальный уровень): $x_{\text{star}} = \{ a_i, \phi_i, B_{\text{topo}}, J_2, J_3, J, \dots \}$.

Звезда (локальный уровень). Для каждого узла нейросети звезды (магнитной трубки или активной области) $i = 1, \dots, N_{\text{nodes,star}}$ (где $N_{\text{nodes,star}} \sim 10^5$): $x_{i,\text{star}} = \{ B_i, \rho_i, v_i, r_i \}$; $w_{i,\text{star}} = B_i^2/(8\pi)$.

Таблица 6.1.1. Иерархия масштабов нейросети звезды.

Масштаб	Структура	Поле	Время жизни	Роль
~1000 км	Гранулы	—	5–10 мин	Быстрые переменные («спайки»)
~30 000 км	Супергранулы	—	1–2 дня	Промежуточные переменные
~100–1000 км	Магнитные трубки	10^4 – 10^5 Гс	Недели–месяцы	Узлы сети
Тахоклин	Крупномасштабная топология	—	~11 лет	Главные медленные переменные
Радиативное ядро	Реликтовые поля	—	$>10^9$ лет	Долговременная память

Передача веса при диссипации: $\Phi_i \rightarrow \Sigma_j \Phi_j$ (вмороженность магнитного потока, теорема Альфвена, сохранение магнитной спиральности $H = \int A \cdot B \, d^3r \approx \text{const}$)

Планета j (глобальный уровень): $x_{\text{planet},j} = \{ B_{\text{planet},j}, T_{\text{mantle},j}, \omega_{\text{rot},j}, \epsilon_{\text{obl},j}, k_{2,j}, Q_j, a_j, e_j, x_{\text{sat},j} \}$.

Планета j (локальный уровень, двухслойная кластерная топология). Быстрый слой (внешнее ядро): узлы — магнитные трубки и потоки жидкого железа (столбы Тейлора): $x_{i,\text{core},j} = \{ B_i, \rho_i, v_i, r_i \}$; $w_{i,\text{core},j} = B_i^2/(8\pi)$. Медленный слой (мантия): узлы — области вязкоупругой ползучести и фазовых переходов: $x_{i,\text{mantle},j} = \{ \eta_i, i, v_i, T_i, r_i \}$; $w_{i,\text{mantle},j} = \eta_i/\eta_0$.

Таблица 6.1.2. Иерархия масштабов нейросети планеты (на примере Земли).

Масштаб / структура	Физическая природа	Характерное поле	Время жизни	Роль
Столбы Тейлора / flux bundles	Конвективные колонны	~4 мТл (40 Гс), g.m.s.	Годы–десятилетия	Быстрые узлы
Тороидальные скрытые потоки	Сдвиговые течения, $\Lambda \sim 1$	до 30 мТл (300 Гс)	Столетия	Скрытые веса
Макро-узлы (хабы): 10–16 СМВ-пятен	Потоковые пятна на ГЯМ	—	100–1000 лет	Главные интеграторы
Мантийные плюмы и слэбы	Вязкоупругая ползучесть	Нет	10^7 – 10^8 лет	Медленные узлы
Текстура внутреннего ядра	Дислокационные сети	—	$>10^9$ лет	Долговременная память

Фундаментальная асимметрия сетей: (1) $N_{star} \sim 10^5$ узлов (дискретные трубки, $R_m \sim 10^{11}$); (2) $N_{planet} \sim 10^3-10^4$ узлов (размытые турбулентные жгуты, $R_m \sim 10^3$). Магнитное число Рейнольдса $R_m = vL/\eta$ определяет скорость утечки (leakage rate) α в терминах RC: для звезды $\alpha_{star} \rightarrow 0$ (колоссальная долговременная память), для планеты α_{planet} значительно больше (постоянная диффузия, требующая непрерывной подкачки).

Биосфера (для обитаемой планеты): $x_{bio} = \{ C_{atm}, C_{ocean}, M_{biomass} \}$.

6.2. Уравнения взаимодействия

6.2.1. Каналы связи звезда $\leftrightarrow$ планета

Канал Ранга 1: приливной резонанс с g-модами. Звезда $\rightarrow$ планета j:

$$u_{star \rightarrow planet, j} = \{ B_{star}(r_j), L_{UV}, v_{wind}, P_{wind}, V_{tidal, j}(J_2, J_3, \dots) \}$$

$$V_{tidal, j} = -(G \cdot M_{star}/r_j) \cdot \Sigma_n (R_{star}/r_j)^n \cdot J_n \cdot P_n(\cos \theta_j)$$

Планета j $\rightarrow$ звезда:

$$u_{planet \rightarrow star, j} = \{ V_{tidal \rightarrow star, j}(k_{2, j}, Q_j, M_j, r_j), B_{planet, j} \}$$

Канал Ранга 2: локальный электромагнитный зонд («крылья Альфвена») — «щуп». Магнитосфера планеты, движущаяся в звёздном ветре, генерирует альфвеновские крылья, которые бьют в поверхность звезды в виде локальных хромосферных горячих пятен. Параметры «щупа»: (1) координаты точки приложения зависят от орбитальной фазы планеты и угла наклона магнитной оси звезды; (2) угол входа определяется относительной скоростью планеты и альфвеновской скоростью в звёздной плазме: $\tan \theta_A = v_{rel}/v_{Alfven}$; (3) амплитуда зависит от магнитного момента планеты и плотности звёздного ветра: $P_{Alfven} \propto B_{planet}^2 \cdot (v_{rel}/v_{Alfven})^2$.

Аналогично, звёздный ветер и CME бьют по магнитопаузе планеты под разными углами в зависимости от сезона и орбитальной позиции, создавая локализованные токи в ионосфере и внешнем ядре.

6.2.2. Каналы связи планета $\leftrightarrow$ биосфера

Планета j $\rightarrow$ биосфера:

$$u_{planet \rightarrow bio} = \{ T_{surface}, P_{atm}, B_{surface}, UV_{flux}, \text{тектоника} \}$$

Биосфера $\rightarrow$ планета:

$$u_{bio \rightarrow planet} = \{ c_{atm} \text{ (биогенное)}, A_{albedo}, \text{выветривание, седиментация} \}$$

6.3. Уравнения обучения (иерархическая двухуровневая структура)

Микроуровень: узлы звезды. Быстрая динамика:

$$dx_{i,star}/dt = F_{i,star}(x_i, \{u_{planet \rightarrow star,j}\}, \{w_{j,star}\})$$

Медленная динамика (иерархическое правило модификации):

$$dw_{i,star}/dt = G_{local,star}(x_i, w_i) + R_{bio}(t) \cdot G_{global,star}(x_i, w_i, \{u_{tide,j}\})$$

Микроуровень: узлы планеты j (внешнее ядро):

$$dx_{i,core,j}/dt = F_{i,core,j}(x_i, u_{star \rightarrow planet,j}, u_{sat \rightarrow planet,j}, \{w_j\})$$

$$dw_{i,core,j}/dt = G_{local,core}(x_i, w) + R_{bio}(t) \cdot G_{global,core}(x_i, w, u_{tide,star})$$

Микроуровень: узлы планеты j (мантия):

$$dw_{i,mantle,j}/dt = G_{local,mantle}(x_i, w_i) + R_{bio}(t) \cdot G_{global,mantle}(x_i, w_i, u_{bio})$$

Макроуровень (после огрубления):

$$dx_{star}/dt = F_{star}(x_{star}, \{u_{planet \rightarrow star,j}\}); dw_{star}/dt = G_{local,star} + R_{bio}(t) \cdot G_{global,star}$$

$$dx_{planet,j}/dt = F_{planet,j}(x_{planet,j}, u_{star \rightarrow planet,j}, u_{bio \rightarrow planet,j})$$

$$dw_{planet,j}/dt = G_{local,planet,j} + R_{bio}(t) \cdot G_{global,planet,j}$$

$$dx_{bio}/dt = F_{bio}(x_{bio}, u_{planet \rightarrow bio})$$

Интерпретация иерархического правила. G_{local} — локальная термодинамическая релаксация:

$$G_{local} = -\partial E_{free}/\partial w + Dynamo(v)$$

Для планеты G_{local} содержит сильный диффузионный член, пропорциональный $1/Rm$ (магнитная диффузия значительна при $Rm \sim 10^3$). G_{global} — глобальное резонансное удержание (приливная накачка энергии, предотвращающая локальную релаксацию). $R_{bio}(t)$ — плавный сигмоидальный триггер биосферы. До появления биосферы ($R_{bio} = 0$) работает только G_{local} ; после появления ($R_{bio} > 0$) включается G_{global} .

6.4. Сигнал качества (вектор биосферной модуляции)

$$R_{bio}(t) = S(t) \cdot (R_{ocean}, R_{tectonic}, R_{ozone})$$

где $S(t) = 1/(1 + \exp(-(t - t_0)/\tau_{bio}))$, $\tau_{bio} \sim 10^8$ лет. Каждый компонент включается с собственным временем:

$$R_{ocean}(t) = R_{ocean,max}/(1 + \exp(-(t - t_{ocean})/\tau_{ocean})), \tau_{ocean} \sim 10^7 \text{ лет}$$

$$R_{tectonic}(t) = R_{tectonic,max}/(1 + \exp(-(t - t_{tectonic})/\tau_{tectonic})), \tau_{tectonic} \sim 10^8 - 10^9 \text{ лет}$$

$$R_{ozone}(t) = R_{ozone,max}/(1 + \exp(-(t - t_{ozone})/\tau_{ozone})), \tau_{ozone} \sim 10^8 \text{ лет}$$

Влияние на параметры планеты. Приливная добротность:

$$Q(\omega; R_{bio}) = Q_0/(1 + \alpha_Q \times R_{ocean}(t))$$

Число Лява:

$$k_2(\omega; R_{bio}) = k_{2,0} + \Delta k_2 \times R_{tectonic}(t)$$

Тепловой приливной момент:

$$\tau_{thermal}(R_{bio}) = \tau_{thermal,0} + \Delta \tau_{thermal} \times R_{ozone}(t)$$

Критическое значение: $R_{critical} \approx 0.5$ (точка перегиба сигмоиды).

6.4.1. Модуляция чисел Лява на геологических масштабах

Быстрая петля (10^5 – 10^6 лет): карбонатно-силикатный цикл.

$$d[CO_2]/dt = F_{volc} - W_{bio}(T_{surface}, [CO_2]) \cdot [CO_2]$$

где $W_{bio} = W_{abiotic} \times (1 + \beta_{bio} \times M_{biomass})$, $\beta_{bio} \sim 10$ – 100 .

Средняя петля (10^7 – 10^8 лет): биогенная седиментация.

$$dM_{sed}/dt = F_{sed\ bio} - F_{subduct}$$

Медленная петля (10^8 – 10^9 лет): оксигенация.

$$d[O_2]/dt = F_{photo} - W_{ox}$$

Объединённое уравнение вязкости мантии:

$$\eta_{mantle}(t) = \eta_0 \times \exp(-\gamma \times C_{sed}(t)) \times f_{ox}(O_2) \times \exp(-\delta \times C_{H_2O}(t))$$

Множитель $\exp(-\delta \cdot C_{H_2O}(t))$ описывает водное разупрочнение мантии через фугитивность [140].

Связь с числом Лява:

$$k_2(\omega; t) = k_{2,0} + \Delta k_2 \times (1 - \eta_{mantle}(t)/\eta_{max})$$

6.5. Мультиквадрупольный момент (локальная генерация)

Глобальные мультипольные моменты возникают как интегралы локальных смещений магнитных трубок:

$$J_n = -(1/(M_{star} \cdot R^n)) \cdot \sum_i \Delta m_i \cdot r^n \cdot P(\cos \theta_i)$$

Локальная генерация квадруполья (механизм Апплгейта):

$$|\Delta J_2| \approx (3/2) \cdot (\Delta m/M_{star}) \cdot (r/R)^2$$

Мультиквадрупольная суперпозиция для N планет:

$$J_n(t) = J_{n,0} + \sum_{j=1}^N A_{n,j} \cdot \cos(m_j \cdot n \cdot t + \varphi_{n,j})$$

где $n_j = \sqrt{(G \cdot M_{star}/a_j^3)}$, m_j — целое число. Персонализированное воздействие: $\omega_n(J_n) \approx m_j \cdot n$.

6.6. Многопараметрическая подстройка планет

Для каждой планеты $j = 1, \dots, N$:

$$d\omega_{rot,j}/dt = f_{tidal,j}(k_{2,j}, Q_j, M_{sat,j}, r_{sat,j}) + f_{star,j}(u_{star \rightarrow planet,j})$$

$$d\varepsilon_{obl,j}/dt = g_{tidal,j}(k_{2,j}, Q_j, M_{sat,j}, r_{sat,j}) + g_{star,j}(u_{star \rightarrow planet,j})$$

$$dk_{2,j}/dt = h_j(x_{planet,j}, u_{bio \rightarrow planet,j})$$

$$dx_{sat,j}/dt = F_{sat,j}(x_{planet,j}, u_{star \rightarrow planet,j})$$

В случае планет изменение их центров масс (перераспределение массы в ядре и мантии) приводит к изменению параметров вращения планет вокруг собственной оси: наклон оси вращения, скорость вращения (LOD — Length of Day).

6.7. Количественная оценка орбитального эффекта (магнитные трубки)

Исходные данные для Солнце–Земля: (1) $\Delta J_2 \sim 10^{-9} - 10^{-8}$ (механизм Апплгейта); (2) $r = 1$ а.е. $= 1.5 \times 10^{11}$ м; (3) масса магнитной трубки $m_{tube} \sim 10^{16}$ кг; (4) радиус трубки $a_{tube} \sim 100 - 1000$ км; (5) поле в трубке $B \sim 10^3 - 10^5$ Гс.

Требуемое ускорение:

$$\begin{aligned}\delta g &= 2\Delta r/t^2 \approx 3 \times 10^{-23} \text{ м/с}^2 \text{ (без резонанса); } \delta g_{\text{рез}} \\ &= 3 \times 10^{-26} \text{ м/с}^2 \text{ (с резонансом, } Q = 10^3)\end{aligned}$$

Требуемое смещение центра масс звезды: без резонанса $\Delta R_{\text{CM}} \approx 0.4 \text{ нм}$; с резонансом $\Delta R_{\text{CM}} \approx 0.0004 \text{ нм}$.

Требуемое смещение магнитной трубки:

$$\Delta r_{\text{tube}} = \Delta R_{\text{CM}} \times (M_{\text{star}}/m_{\text{tube}})$$

Без резонанса: $\Delta r_{\text{tube}} \approx 0.4 \times 10^{-9} \times (2 \times 10^{30}/10^{16}) \approx 8 \times 10^4 \text{ м} \approx 80 \text{ км}$; с резонансом: $\Delta r_{\text{tube}} \approx 80 \text{ м}$.

Смещение центра масс одной трубкой (при $\Delta r = 10^5 \text{ м}$):

$$\Delta R_{\text{CM}} = (10^{16}/(2 \times 10^{30})) \times 10^5 \approx 5 \times 10^{-10} \text{ м} \approx 0.5 \text{ нм}$$

Это того же порядка, что и требуемое смещение ($\sim 0.4 \text{ нм}$). Одна магнитная трубка способна создать достаточное смещение. Запас: трубка может всплывать на $\sim 10^4\text{--}10^5 \text{ км}$ (от тахоклина до поверхности), что в $\sim 10^3$ раз превышает требуемое.

Критическое уточнение: статическое смещение не вызывает миграцию. Необходим осциллирующий квадруполь с фазовым сдвигом $\Delta\phi \neq 0$.

6.8. Сложность системы и методы решения

Полная система содержит $\sim 10^6\text{--}10^8$ степеней свободы. После огрубления — $\sim 10^3\text{--}10^4$ релевантных переменных. Размерность задачи для Солнце–Земля: $N_{\text{star}} (10^5) + N_{\text{planetcore}} (10^4) + N_{\text{planetmantle}} (\sim 10^3) \approx 1.1 \times 10^5$ узлов. Благодаря тому, что планетарная сеть на 5 порядков меньше звёздной, её полное интегрирование не создаёт вычислительного «бутылочного горлышка».

Таблица 6.8.1. Методы решения.

Метод	Применимость	Ограничения
Прямое численное интегрирование	$\sim 10^3\text{--}10^4$ уравнений	Суперкомпьютеры
Модальные разложения	Доминирующие моды	Потеря нелинейных взаимодействий
Нейросетевые аппроксиматоры	Экстраполяция	Требует обучающих данных
Резервуарные вычисления	Физические среды	Требует считывателя

6.9. Математическая модель задачи самостабилизации

6.9.1. Орбитальная динамика (N планет)

Для каждой планеты $j = 1, \dots, N$:

$$d^2 r_j / dt^2 = -G \cdot M_{star} \cdot r_j / |r_j|^3 + \sum_{k \neq j} G \cdot M_k \cdot (r_k - r_j) / |r_k - r_j|^3 + F_{tidal,j} + F_{multipole,j}$$

6.9.2. Топология нейронных сетей звезды и планеты

Звезда: нейросеть в конвективной зоне. Узлы — магнитные трубки (не гранулы). Связи — магнитное натяжение силовых линий. Планета: двухслойная кластерная нейросеть. Быстрый слой — внешнее ядро (столбы Тейлора и магнитные жгуты, 10^3 – 10^4 узлов). Медленный слой — мантия (вязкоупругая ползучесть). 10–16 СМВ-пятен на границе ядро–мантия выступают как супер-узлы (хабы), модулирующие обмен угловым моментом между ядром и мантией.

Связь весов и расстояний:

$$|r_i - r_j| = f(w_{ij})$$

Смещение центра масс при перераспределении:

$$\Delta r_{CM} = (1/M_{star}) \cdot \int_{layer} \delta \rho(r) \cdot r \, d^3 r$$

6.9.3. Смещение центра масс (МГД-интерпретация и локальный механизм Апплгейта)

Локальное динамо: приливное воздействие модулирует сдвиговые течения → усиление магнитного поля в конкретных трубках (увеличение весов). Магнитная плавучесть (неустойчивость Паркера):

$$\Delta r_{tube} = [1/(\rho_{tube} \cdot g)] \cdot \nabla (B_{tube}^2 / 8\pi) \cdot \tau_{relax,tube}$$

Напряжение Максвелла: передача углового момента между трубками. Правило обучения (уравнение магнитной индукции):

$$\partial B / \partial t = \nabla \times (v \times B) + \eta \nabla^2 B$$

Физическая природа скорости утечки (Leakage Rate): баланс между обучением (индукция) и забыванием (диффузия) диктуется магнитным числом Рейнольдса $Rm = vL/\eta$:

$$\partial B / \partial t = \nabla \times (v \times B) + (1/Rm) \cdot \nabla^2 B$$

Для звезды ($Rm \sim 10^{11}$) диффузией можно пренебречь — веса обладают высокой стабильностью. Для планеты ($Rm \sim 10^3$) диффузия значительна: турбулентные магнитные жгуты постоянно размываются, что требует непрерывной диссипативной подкачки.

Иерархическое правило модификации:

$$dw_i/dt = G_{local}(x_i, w_i) + R_{bio}(t) \cdot G_{global}(x_i, w_i, u_{tide})$$

где $G_{local} = -\partial E_{free}/\partial w + \text{Dynamo}(v)$ — локальная релаксация, G_{global} — глобальное резонансное удержание.

Смещение центра масс одной магнитной трубкой:

$$\Delta R_{CM} \approx (m_{tube}/M_{star}) \cdot \Delta r_{tube} \approx (10^{16}/(2 \times 10^{30})) \times 10^5 \approx 0.5 \text{ нм}$$

Для когерентного смещения $\sim 10^5$ – 10^6 трубок: $\Delta R_{CM} \approx 0.05 \text{ мм}$, что создаёт $\Delta J_2 \sim 10^{-8}$.

6.9.4. Физика приливного взаимодействия и природа входного сигнала

Для системы Солнце–Земля: $\beta \sim 2 \times 10^{-11}$ (режим слабых приливов). Амплитуда конвекции не возмущается. Входной сигнал имеет три формы:

(а) Когерентное фазовое подсинхронивание:

$$\partial B/\partial t = \nabla \times ((v_{conv} + \sum_j v_{tide,j}) \times B) + \eta \nabla^2 B$$

(б) Динамический прилив и резонансы.

(в) Приливной момент и дифференциальное вращение:

$$\partial(\rho r^2 \Omega)/\partial t + \nabla \cdot (\rho r^2 \Omega v_{conv}) = \tau_{mag}(B) + \sum_j \tau_{tide,j}(v_{tide,j})$$

Механизм влияния на внешнее ядро планеты (через «щуп»):

1. Приливная деформация ГЯМ: $\Delta h_{СМВ}(t) = \Delta h_0 \cdot \cos(\omega_{tide} \cdot t)$, $\Delta h_0 \sim 1 \text{ см}$.
2. Изменение давления: $\Delta P_{СМВ} = \rho_{core} \cdot g_{СМВ} \cdot \Delta h_{СМВ}$.
3. Генерация потоков в жидком ядре (столбы Тейлора).
4. Модуляция геодинамо: $\partial B/\partial t = \nabla \times (v \times B) + \eta_{core} \cdot \nabla^2 B$.
5. Изменение веса: $\Delta w_{i,core} \approx B_i \cdot \Delta B_i / (4\pi)$.

Электромагнитный «щуп крыльев Альфвена»: звёздный ветер бьёт по магнитопаузе планеты под переменным углом (зависит от орбитальной фазы), создавая локализованные токи в ионосфере и внешнем ядре.

6.9.5. Правило модификации весов: физическая интерпретация

Три компоненты: (а) индукционная:

$$\partial B / t = \nabla \times ((v_0 + \delta v(V_{tidal})) \times B) + \eta \nabla^2 B$$

(б) моментная:

$$\partial(pr^2\Omega)/\partial t + \nabla \cdot (pr^2\Omega v) = \tau_{mag}(B) + \Sigma_j \tau_{tidal,j}(V_{tidal,j})$$

(в) резонансная: $\omega_n(J_n) \approx m_j \cdot n_j$. Вход сигнала качества:

$$G(x, w; R_{bio}) = G(x, w; V_{tidal}(k_2(R_{bio})/Q(R_{bio})))$$

6.9.6. Каналы связи и модуляция сигнала

Канал планета j $\rightarrow$ звезда:

$$u_{j \rightarrow star}(t) = V_{tidal,j}(M_j, r_j, k_2, j(\omega), Q_j(\omega))$$

Канал звезда $\rightarrow$ планета j:

$$u_{star \rightarrow j}(t) = V_{multipole,j}(J_2(t), J_3(t), \dots, r_j)$$

Задача подбора модуляции: автоматический запуск/отключение механизма автостабилизации.

6.9.7. Формализация направленности

$$\Delta r_{CM} = \Delta r_{\parallel} \cdot \hat{n} + \Delta r_{\perp}$$

Для стабилизации необходимо $\Delta r_{\parallel} \neq 0$. Направленность обеспечивается асимметричным перераспределением:

$$\delta \rho(r) = \delta \rho_0 \cdot f(r) \cdot \cos(\theta)$$

6.9.8. Аналитическая цепочка: от смещения массы к миграции орбиты

Шаг 1: $|\Delta J_2| \approx (3/2) \cdot (\Delta m / M_{star}) \cdot (r/R)^2$.

Шаг 2: $\delta g_j = (3/2) \cdot (G \cdot M_{star} / r_j^2) \cdot \Delta J_2 \cdot (R/r_j)^2$

Шаг 3: $\langle \dot{a}_j \rangle \approx C \cdot a_j \cdot n \cdot \Delta J_2 \cdot \sin(\Delta \varphi_j)$

Критическое условие: статический ΔJ_2 не вызывает миграцию; необходим осциллирующий с $\sin(\Delta \varphi_j) \neq 0$. Обобщение на N планет:

$$J_n(t) = J_{n,0} + \Sigma_{j=1}^N A_{n,j} \cdot \cos(m_j \cdot n \cdot t + \varphi_{n,j})$$

6.9.9. Обеспечение когерентности

Корреляционная функция:

$$C(r_1, r_2, t) = \langle \delta\rho(r_1, t) \cdot \delta\rho(r_2, t) \rangle$$

Для когерентности: $C > 0$ при $|r_1 - r_2| \sim R_{CZ}$. Три механизма: приливная синхронизация, магнитная топология ($w_{ij} \propto B^2/(8\pi)$), глобальные осцилляционные моды.

6.9.10. Резонансная селективность для N планет

Условие резонанса: $\omega_n(J_n) \approx m_j \cdot n$. Многоканальная селективность:

$$J_n(t) = \sum_{j=1}^N A_{n,j} \cdot \cos(\omega_n \cdot t + \varphi_{n,j})$$

6.9.11. Стохастические возмущения и устойчивость резонанса

Масштаб возмущений:

$$\delta g_k / g_{star} \approx (M_k / M_{star}) \times (r_j / r_k)^3$$

Ширина резонанса:

$$\Delta\omega/n \approx \sqrt{(\Delta J_2 \cdot (R/r_{orb})^2)}$$

Для Солнце–Земля: $\Delta\omega/n \approx 4.7 \times 10^{-7}$. Возмущение от Юпитера (7×10^{-6}) превышает ширину на порядок $\rightarrow$ необходим адаптивный механизм. Адаптивная подстройка:

$$\omega_n(t) = m_j \cdot n_j(t) + \delta\omega_{коррекция}$$

Условие адаптации: $|\dot{\omega}_{res}/dt - \dot{n}_j/dt| < \Delta\omega$. Время адаптации: $\tau_{adapt} \sim 1/(\varepsilon \cdot n_j)$. Для успешной адаптации: $\varepsilon \geq 10^{-10}$. Стохастическая модель:

$$d^2 r_j / dt^2 = -G(M_{star} + M_j) \cdot r_j / |r_j|^3 + F_{multipole,j} + F_{шум}(t)$$

$$\langle F_{шум}(t) \rangle = 0, \langle F_{шум}(t) \cdot F_{шум}(t') \rangle = \sigma_{шум}^2 \cdot \delta(t - t')$$

6.9.12. Цепочка возбуждения механизма автостабилизации

Звезда:

1. Приливные потенциалы планет модулируют условия в конвективной зоне звезды.
2. Возбуждение нейросети: магнитные трубки в зонах максимального приливного потенциала.
3. Изменение весов: уравнение магнитной индукции, модулируемое R_{bio} .
4. Перераспределение массы: магнитная плавучесть, напряжение Максвелла.

5. Смещение центра масс: $\Delta r_{CM} \sim 4\text{--}7$ км, $\Delta J_2 \sim 10^{-9}\text{--}10^{-8}$.

6. Воздействие на планеты: резонансная селективность, суперпозиция гармоник.

Планета (симметричная обработка):

1. Приливная деформация ГЯМ создаёт потоки в жидком ядре (столбы Тейлора).
2. Магнитные жгуты ядра модифицируют веса.
3. Изменение весов меняет числа Лява и магнитное поле.
4. 10–16 СМВ-пятен (хаб-узлы) модулируют обмен угловым моментом с мантией.
5. Изменение чисел Лява модулирует приливный отклик, замыкая контур.
6. Электромагнитный «щуп крыльев Альфвена» создаёт локализованные токи.

В случае планет изменение их центров масс (перераспределение массы в ядре и мантии) приводит к изменению параметров вращения планет вокруг собственной оси: наклон оси вращения, скорость вращения (LOD — Length of Day).

6.9.13. Количественные оценки для системы Солнце–Земля

Требуемое смещение орбиты: $\Delta r \sim 0.1$ а.е. за 10^9 лет. Требуемое ускорение: $\delta g \approx 3 \times 10^{-23}$ м/с²; с резонансом: $\delta g_{рез} \approx 3 \times 10^{-26}$ м/с². Требуемое смещение центра масс: $\Delta R_{CM} \approx 0.4$ нм (без резонанса), 0.0004 нм (с резонансом). Требуемое смещение магнитной трубки ($m \approx 10^{16}$ кг): ≈ 80 км (без резонанса), ≈ 80 м (с резонансом). Смещение одной трубкой на 10^5 м: $\Delta R_{CM} \approx 0.5$ нм $\approx$ требуемому.

6.9.14. Итоговые уравнения модели

Орбитальная динамика (для каждой планеты j):

$$\begin{aligned} d^2 r_j / dt^2 = & -G(M_{star} + M_j) \cdot r_j / |r_j|^3 + \sum_{k \neq j} G \cdot M_k \cdot (r_k - r_j) / |r_k - r_j|^3 \\ & + F_{tidal,j} + F_{multipole,j} \end{aligned}$$

Внутренняя динамика звезды (микроуровень, магнитные трубки i):

$$dx_{i,star} / dt = F_{i,star}(x_i, \{u_{planet \rightarrow star,j}\}, \{w_{j,star}\})$$

$$dw_{i,star} / dt = G_{local,star}(x_i, w) + R_{bio}(t) \cdot G_{global,star}(x_i, w, \{u_{tide,j}\})$$

Внутренняя динамика планеты j (внешнее ядро):

$$dx_{i,core,j} / dt = F_{i,core,j}(x_i, u_{star \rightarrow planet,j}, \{w_{j,core}\})$$

$$dw_{i,core,j} / dt = G_{local,core}(x_i, w_i) + R_{bio}(t) \cdot G_{global,core}(x_i, w_i, u_{tide,star})$$

Внутренняя динамика планеты j (мантия):

$$dw_{i,mantle,j}/dt = G_{local,mantle}(x_i, w_i) + R_{bio}(t) \cdot G_{global,mantle}(x_i, w_i, u_{bio})$$

Макроуровень:

$$dx_{star}/dt = F_{star}(x_{star}, \{u_{planet \rightarrow star,j}\}); dw_{star}/dt = G_{local,star} + R_{bio}(t) \cdot G_{global,star}$$

$$dx_{planet,j}/dt = F_{planet,j}(x_{planet,j}, u_{star \rightarrow planet,j}, u_{bio \rightarrow planet,j})$$

$$dw_{planet,j}/dt = G_{local,planet,j} + R_{bio}(t) \cdot G_{global,planet,j}$$

$$dx_{bio}/dt = F_{bio}(x_{bio}, u_{planet \rightarrow bio})$$

Сигнал качества:

$$R_{bio}(t) = S(t) \cdot (R_{ocean}, R_{tectonic}, R_{ozone})$$

Связь весов и мультиполей:

$$J_n(t) = -1/(M_{star} \cdot R^n) \cdot \Sigma_i \Delta m_i \cdot r^n \cdot P_n(\cos \theta_i)$$

Мультиквадрупольная суперпозиция:

$$J_n(t) = J_{n,0} + \Sigma_{j=1}^N A_{n,j} \cdot \cos(m_j \cdot n_j \cdot t + \varphi_{n,j})$$

Связь весов планеты с числами Лява:

$$k_{2,j}(\omega; t) = k_{2,0,j} + \Delta k_{2,j} \times (1 - \eta_{eff,j}(\{w_{i,mantle,j}\})/\eta_{max,j})$$

$$Q_j(\omega; t) = Q_{0,j}/(1 + \alpha_{ocean,j} \times R_{ocean,j} + \alpha_{core,j} \times f_{core,j}(\{w_{i,core,j}\}))$$

Объединённое уравнение вязкости мантии:

$$\eta_{mantle,j}(t) = \eta_0 \times \exp(-\gamma \times C_{sed}(t)) \times f_{ox}([O_2]_j(t)) \times \exp(-\delta \times C_{H_2O,j}(t))$$

6.9.15. Оценка вычислительной реализуемости и двухфазная процедура

Таблица 6.9.1. Уровни реализуемости.

Уровень	Число узлов	Реализуемость	Горизонт
Игрушечная (2–10)	~20–100 уравнений	Полностью	Месяцы
Редуцированная (~10 ³)	~10 ⁴ –10 ⁵	С упрощениями	1–3 года
Реалистичная (~10 ⁶)	~10 ⁷ –10 ⁸	Суперкомпьютеры	5–10 лет
Полная 3D МГД	~10 ⁹ –10 ¹⁰	За пределами	Десятилетия

Двухфазная процедура. Фаза А (предобучение, R_{bio} = 0):

$$dw_i/dt = G_{local}(x_i, w)$$

Критерий завершения: $|dw_i/dt| < \delta_w$ для всех i . Фаза Б (тонкая настройка, $R_{bio} > 0$):

$$dw_i/dt = G_{local}(x_i, w_i) + R_{bio}(t) \cdot G_{global}(x_i, w, u_{tide})$$

Начальное условие: $w_i(t_{bio}) = w_{pre,i}$.

Таблица 6.9.2. Поэтапный план.

Этап	Что делается	Срок
1. Игрушечная модель	2–10 узлов, проверка концепции	3–6 мес.
2. Редуцированная модель	$\sim 10^3$ узлов, количественная оценка	1–2 года
3. Стохастическая модель	Шум от других планет	1–2 года
4. Многопланетная модель	Резонансная селективность	2–3 года
5. Связь с биосферой	Сигнал качества R_{bio}	1–2 года

Таблица 6.9.3. Параметры модели.

Параметр	Значение
ϵ_{star}	10^{-9} – 10^{-12}
Q (добротность)	10^2 – 10^4
α_Q	~ 2
Δk_2	~ 0.01
β_{bio}	10–100
τ_{bio}	$\sim 10^8$ лет
τ_{ocean}	$\sim 10^7$ лет
$\tau_{tectonic}$	10^8 – 10^9 лет
τ_{ozone}	$\sim 10^8$ лет
m_{tube} (звезда)	$\sim 10^{16}$ кг
a_{tube}	100–1000 км
B (в трубке звезды)	10^3 – 10^5 Гс
B (в жгутах ядра Земли)	~ 4 мТл (40 Гс), r.m.s.
Rm (звезда)	$\sim 10^{11}$
Rm (ядро Земли)	$\sim 10^3$

Критерии успеха:

1. Наличие отклика звезды на приливные потенциалы планет.
2. Направленность отклика (резонансная селективность).
3. Способность стабилизировать орбиты за $\sim 10^8$ – 10^9 лет.
4. Устойчивость к стохастическим возмущениям.
5. Автостабилизация при наличии R_{bio} .

6.10. Проблема начальных весов: физическое предобучение и постепенный триггер

6.10.1. Разделение физической эволюции и обучения

Тип 1: Физическая эволюция (всегда, независимо от сигнала качества):

$$dw_i/dt = G_{phys}(x_i, w, \{w\}, u_{external})$$

Тип 2: Обучение (только при нетривиальном сигнале качества):

$$dw_i/dt = G_{phys}(x_i, w_i, \{w_i\}, u_{external}) + R_{bio}(t) \cdot G_{bio}(x_i, w, \{w\})$$

6.10.2. Фаза А: физическое предобучение

Магнитное динамо самоорганизуется в метастабильные конфигурации. Орбитальная миграция обеспечивает «слепое сканирование» фазового пространства. Система формирует физически предобученные веса.

6.10.3. Фаза Б: тонкая настройка

Биосфера выступает как «считыватель», корректирующий веса через модуляцию чисел Лява.

6.10.4. Постепенный триггер

$$R_{bio}(t) = R_{max}/(1 + \exp(-(t - t_0)/\tau_{bio}))$$

6.10.5. Вычислительная процедура

Фаза А: $R_{bio} = 0$, критерий завершения: $|dw_i/dt| < \delta_w$. Фаза Б: включение $R_{bio}(t)$, начальное условие: $w_i(t_{bio}) = w_{pre,i}$.

Физические ограничения как ландшафт предобучения. В физической нейронной сети «веса» жёстко привязаны к физическим параметрам среды. Законы классической механики и термодинамики выступают в роли жёстких ограничений (constraints), формирующих ландшафт, по которому релаксирует система. До появления биосферы (Фаза А) правило модификации весов диктуется исключительно стремлением к диссипации и сохранению углового момента. Естественная орбитальная миграция планеты означает, что система непрерывно «зондирует» радиальное пространство вокруг звезды. Когда в процессе этого дрейфа планета попадает в зону обитаемости и формирует океаны, включается сигнал качества R_{bio} , и система

переходит из режима слепого сканирования в режим резонансного захвата (направленной стабилизации), «запирая» веса в конфигурации, удерживающей планету в благоприятных условиях.

Количественная реализация этой модели, включая калибровку функций G_{local} и G_{global} , является задачей 8.3.6.

6.11. Вычислительная верификация концепции направленной стабилизации на редуцированной МГД-модели

6.11.1. Цель и логика эксперимента

Цель эксперимента — доказательство концепции (proof-of-concept): показать, что сплошная проводящая среда с нелинейной диссипативной динамикой, функционирующая как физический резервуар (Разделы 2.2, 6.0), способна без телеологического управления обеспечить захват и удержание мигрирующей планеты в обитаемой зоне. Эксперимент воспроизводит трёхфазную схему Раздела 4.5: (1) слепое сканирование фазового пространства посредством приливной миграции; (2) срабатывание биосферного триггера при входе в обитаемую зону; (3) замыкание контура обратной связи и направленная стабилизация.

6.11.2. Резервуар: сеть связанных осцилляторов Лоренца

Резервуар представляет собой сеть из N узлов, каждый из которых описывается уравнениями Лоренца — результата Фурье–Галёркинского усечения уравнений анэластической МГД (Раздел 6.0.2), — связанных магнитным натяжением силовых линий:

$$dX_i/dt = \sigma(Y_i - X_i) + \sum_j C^{(1)}_{ij}X_j + u_{\text{tide}}(t, \theta_i) \quad (6.11.1)$$

$$dY_i/dt = rX_i - Y_i - XZ_i + \sum_j C^{(2)}_{ij}Y_j \quad (6.11.2)$$

$$dZ_i/dt = X_iY_i - bZ_i + \sum_j C^{(3)}_{ij}Z_j \quad (6.11.3)$$

где $i = 1 \dots N$; σ, r, b — стандартные параметры Лоренца; C^0 — матрицы связей. Приливный вход имеет квадрупольную угловую структуру, воспроизводящую (с точностью до нормировки) полином Лежандра P_2 :

$$u_{\text{tide}}(t, \theta) = A_{\text{tide}} \cdot (3\cos^2\theta - 1) \cdot \cos(\omega_{\text{tide}} \cdot t) \quad (6.11.4)$$

Матрицы связей строятся как случайные матрицы с экспоненциальным пространственным затуханием, отражающим локальность магнитных связей вдоль одномерной топологии магнитных трубок:

$$C^{(k)}_{ij} = (\varepsilon_c/N) \cdot A^{(k)}_{ij} \cdot \exp(-|i - j|/L_c), k = 1, 2, 3 \quad (6.11.5)$$

и нормируются по верхней оценке спектрального радиуса (∞ -норма) до целевого значения $\rho_{\text{target}} < 1$:

$$C^{(k)} \leftarrow C^{(0)} \cdot \rho_{\text{target}} / \|C^{(k)}\|_{\infty}, \|C^{(k)}\|_{\infty} = \max_j \sum_i |C^{(0)}_{ij}| \geq (C^{(0)}) \quad (6.11.6)$$

Условие $\rho_{\text{target}} < 1$ гарантирует нахождение сети в режиме эхо-состояния (echo state property, ESP), необходимом для корректной работы резервуара (Раздел 6.0.4).

6.11.3. Орбитальная динамика и приливная миграция

Планета описывается точечной массой в поле звезды; радиус орбиты и средняя (орбитальная) частота:

$$r_p = \sqrt{(x_p^2 + y_p^2)}, \quad n = \sqrt{(GM/r_p^3)} \quad (6.11.7)$$

Уравнения движения включают гравитацию звезды, квадрупольное возмущение и тангенциальную силу приливной миграции:

$$dv_x/dt = -GM \cdot x_p/r_p^3 + a_{J2} \cdot (x_p/r_p) - \kappa(\Omega_{\text{star}} - n)(1 - R_{\text{bio}})(y_p/r_p) \quad (6.11.8a)$$

$$dv_y/dt = -GM \cdot y_p/r_p^3 + a_{J2} \cdot (y_p/r_p) + \kappa(\Omega_{\text{star}} - n)(1 - R_{\text{bio}})(x_p/r_p) \quad (6.11.8b)$$

где единичный тангенциальный вектор $\hat{t} = (-y_p, x_p)/r_p$ направлен по ходу орбитального движения. Направление и скорость миграции определяются разностью частот вращения звезды и орбитального движения (Раздел 4.5): при $\Omega_{\text{star}} > n$ приливный горб опережает планету, угловой момент передаётся планете и орбита расширяется; при $\Omega_{\text{star}} < n$ миграция направлена внутрь. Квадрупольное возмущение радиально:

$$a_{J2} = (3/2)(GM/r_p^2) \cdot J_2 \cdot (R_{\text{star}}/r_p)^2 \quad (6.11.9)$$

6.11.4. Биосферный триггер и замыкание контура обратной связи

Сигнал качества биосферы моделируется гладким сигмоидальным триггером, включающимся при приближении планеты к обитаемой зоне:

$$R_{\text{bio}}(r_p) = [1 + \exp(-((r_p - r_{\text{HZ}}) + \delta)/w)]^{-1} \quad (6.11.10)$$

где $\delta = 0.15$ — сдвиг точки включения, $w = 0.03$ — ширина перехода. Мультипольный момент, генерируемый резервуаром, модулируется триггером:

$$J_2(t) = (W_{out} \cdot Z(t)) \cdot R_{bio}(r_p) \quad (6.11.11)$$

Одновременно триггер подавляет миграцию множителем $(1 - R_{bio})$ в (6.11.8): вне обитаемой зоны планета свободно мигрирует (фаза 1), при входе в зону биосфера «останавливает» слепое сканирование (фаза 3), и резервуар удерживает планету. Именно эта связка реализует направленный отбор конфигураций без внешнего целеполагания (Раздел 9).

Множитель $(1 - R_{bio})$ в (6.11.8) интерпретируется как интерполяция между резонансно-захваченным (быстрым) и незапертым (равновесно-приливным) режимами миграции: биосферная модификация $k_2/Q(\omega)$ расстраивает резонансную фиксацию, поддерживающую быстрое слепое сканирование (Fuller et al. 2016 [109]; Lainey et al. 2020 [75]). Отношение $\kappa_{eq}/\kappa_{lock} \approx 0.01 - 0.1$ в редуцированной модели не разрешается отдельно; его роль играет остаточный дрейф в захваченном режиме. Строгая форма расстройки вычисляется в иерархии Tier-2 через частотно-зависимые числа Лява с океанским резонансом (задача 8.3.7).

6.11.5. Обучение считывателя

Веса считывателя W_{out} определяются гребневой регрессией по траектории состояний резервуара, собранной на фазе слепого сканирования (без обратной связи):

$$W_{out} = (Z^T Z + \lambda I)^{-1} Z^T J_2 \quad (6.11.12)$$

где J_2^* — целевой сигнал компенсации дрейфа; λ — параметр регуляризации. Первые ~20 безразмерных единиц траектории (washout-транзиент) из обучения исключаются. Подчеркнем: обучается только выходной слой; внутренняя динамика резервуара задаётся исключительно уравнениями (6.11.1)–(6.11.3), что исключает телеологию (Раздел 6.0).

6.11.6. Начальные условия, параметры и численный метод

Планета рождается в области протопланетного диска на круговой орбите:

$$r_p(0) = r_{birth} = 0.3, \vec{v}(0) = \sqrt{GM/r_{birth}} \cdot \hat{t}(0) \quad (6.11.13)$$

Таблица 6.11.1. Параметры редуцированной демонстрации.

Параметр	Значение	Смысл
N	1000	число узлов резервуара
σ ; r; b	10; 24; 8/3	параметры Лоренца (режим границы хаоса)
ε_c ; L_c	0.1; 50	сила и радиус корреляции связей

ρ_{target}	0.95	целевой спектральный радиус (ESP)
$GM; R_{\text{star}}$	1; 0.05	масса и радиус звезды (норм. ед.)
$\Gamma_{\text{birth}}; \Gamma_{\text{HZ}}$	0.3; 1.0	место рождения; центр обитаемой зоны
$A_{\text{tide}}; \omega_{\text{tide}}$	0.05; 2.0	амплитуда и частота приливного входа
Ω_{star}	7.0	частота вращения звезды (быстрая молодая звезда)
κ	10^{-3}	эффективный коэффициент приливной миграции
λ	10^{-4}	регуляризация гребневой регрессии
t_{max}	600	полное время интегрирования

Интегрирование выполнено адаптивным методом Дорманда–Принса 8-го порядка (DOP853) с относительной и абсолютной точностями 10^{-8} и 10^{-10} соответственно (scipy.integrate.solve_ivp). Расчёты проведены на CPU (Intel Core i7-13400KF); использование процессорных вычислений обусловлено отсутствием поддержки CUDA-ядер архитектуры sm₈₉ для нативной Windows в доступных сборках JAX, при этом результаты полностью аппаратно независимы. Полное время расчёта одной конфигурации — порядка минут.

6.11.7. Результаты

Результаты представлены на Рис. 1. Фазовые портреты (панели a, b) демонстрируют странный аттрактор сети в режиме границы хаоса, подтверждающий высокую размерность и нелинейность динамики резервуара. Ключевая панель (c) воспроизводит полный трёхфазный цикл: до $t \approx 250$ кривые обоих сценариев совпадают (фаза 1, слепое сканирование — планета мигрирует наружу, причём скорость миграции растёт с удалением, поскольку n падает и разность $(\Omega_{\text{star}} - n)$ увеличивается); в базовом сценарии планета пересекает обитаемую зону транзитом и к $t \approx 330$ необратимо покидает её ($r_p > 3$), тогда как в сценарии с замкнутым контуром при $t \approx 300$ –350 срабатывает триггер (6.11.10), миграция прекращается и планета захватывается, удерживаясь на $r_p = 1.00$ с амплитудой колебаний не более ~ 0.02 вплоть до $t = 600$ (фаза 3). Эмергентный сигнал резервуара (панель d) после washout-транзиента выходит на квазистационарное плато, медленно отслеживающее орбитальное состояние. Автокорреляционная функция состояний резервуара (панель e) демонстрирует осциллирующее затухание ниже 95% доверительного интервала к лагу ≈ 50 –75, что является прямым численным подтверждением затухающей памяти и выполнения свойства эхо-состояния.

Полученный результат (Рис. 1) представляет собой прямое вычислительное доказательство работоспособности трёхфазного механизма: в отсутствие обратной связи миграция носит характер необратимого транзита через обитаемую зону, тогда как замкнутый контур «резервуар–биосфера–орбита» обеспечивает захват и долговременное удержание планеты. Принципиально важно, что стабилизация не заложена в модель априори: она возникает как эмерджентное свойство нелинейной динамики резервуара, веса считывателя которого были обучены на данных, собранных в фазе слепого сканирования (без обратной связи), при выполнении свойства эхо-состояния. Тем самым редуцированная модель подтверждает гипотезу Н1.1 и обосновывает переход к полно-3D анэластическим МГД-симуляциям (задача 8.3.6).

Важно разграничивать условие активации и механизм стабилизации. Условие включения обратной связи (сигнал качества R_{bio}) в редуцированной модели введено феноменологически как сигмоидальная функция орбитального радиуса (уравнение 6.11.10). Однако сам стабилизирующий отклик (генерация компенсирующего квадрупольного момента J_2) не запрограммирован аналитически. Он возникает как эмерджентное свойство нелинейной динамики резервуара, веса считывателя которого были обучены исключительно на данных фазы слепого сканирования. Таким образом, модель не содержит априорного «закона сохранения орбиты»; она демонстрирует, что при наличии нетривиального триггера физическая среда способна эмерджентно выработать компенсирующий отклик.

Безразмерное усиление γ в (6.11.9)–(6.11.11) не является свободным параметром модели, а служит зондом природного разнообразия систем: в размерной форме эффективное усиление квадрупольного канала γ_{eff} выводится из физических свойств конкретной пары — глубины конвективной зоны и вращения звезды (масса, возраст, металличность), бюджета магнитной активности и осуществимости механизма Апштейна (Marsh & Pringle 1990 [118]; Lanza 2006 [116]; Völschow et al. 2016 [117]: осуществимо в 4 из 16 систем), океанского инвентаря и частотной зависимости k_2/Q планеты (Makarov & Efroimsky 2022; Lainey et al. 2024), близости орбитальной частоты к спектру g-мод звезды. Все эти факторы закладываются при формировании системы, вследствие чего γ_{eff} играет роль «генетической» характеристики пары звезда–планета. Измеренное окно стабилизации $[\gamma_{\text{hold}}, \gamma_{\text{over}}]$ (раздел 6.11.12, Рис. 7) превращается в популяционное предсказание: сигнатуры направленной стабилизации должны концентрироваться в подмножестве систем с γ_{eff} внутри окна.

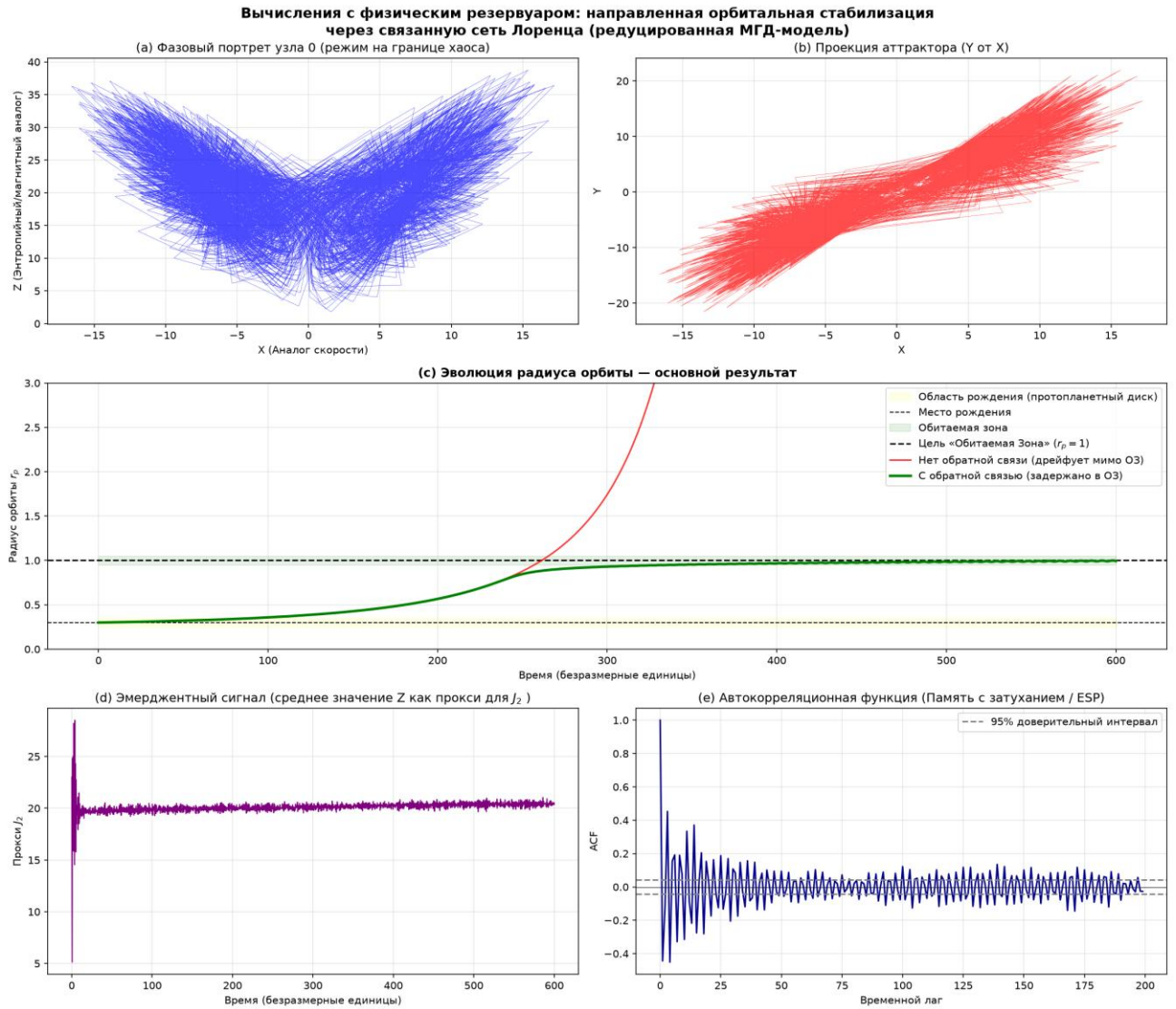


Рисунок 1. Вычислительная демонстрация направленной орбитальной стабилизации посредством физического резервуара на редуцированной МГД-модели. (a) Фазовый портрет узла сети в плоскости X–Z: странный аттрактор в режиме границы хаоса ($r = 24$). (b) Проекция аттрактора в плоскости X–Y. (c) Эволюция радиуса орбиты $r_p(t)$: красная кривая — базовый сценарий без обратной связи (планета, рождённая на $r = 0.3$, мигрирует наружу, пересекает обитаемую зону транзитом при $t \approx 250$ и необратимо покидает её); зелёная кривая — сценарий с замкнутым контуром обратной связи (при приближении к обитаемой зоне срабатывает биосферный триггер, миграция прекращается, планета захватывается и удерживается на $r_p = 1.00$ до конца интегрирования, $t = 600$). (d) Эмерджентный сигнал резервуара (среднее Z как прокси квадрупольного момента J_2): после переходного процесса сигнал выходит на квазистационарное плато, отслеживающее орбитальное состояние. (e) Автокорреляционная функция состояний резервуара: осциллирующее затухание ниже 95% доверительного интервала к временному лагу ≈ 50 –75 подтверждает наличие затухающей памяти (свойство эхо-состояния). Сеть из $N = 1000$ связанных осцилляторов Лоренца; интегратор DOP853, $\text{rtol} = 10^{-8}$.

Параметрическое исследование и «парадокс перестабиллизации». В дополнение к математическому доказательству концепции, было проведено исследование физической устойчивости механизма при варьировании силы связи между биосферным триггером и орбитальной динамикой. Для количественной оценки был введён безразмерный параметр усиления связи γ , масштабирующий вклад биомассы в квадрупольный момент планеты ($J_2 \sim 10^{-10}$ при $\gamma = 1$).

Определение: «парадокс перестабиллизации» (over-stabilization paradox) — нетривиальный динамический режим, возникающий при экстремальном усилении биосферно-орбитальной связи ($\gamma \gg 1$), в котором обратная связь становится настолько жёсткой, что «замораживает» орбиту планеты на границе обитаемой зоны, подавляя климатическую адаптацию и препятствуя развитию биосферы. Этот результат указывает на фундаментальный принцип: для долгосрочной обитаемости важна не максимальная сила связи, а её сбалансированность.

Результаты параметрического исследования представлены на Рис. 2. При использовании строгих физических констант ($\gamma = 1$) планета эволюционирует под действием классических приливных сил, мягко дрейфуя к центру обитаемой зоны, где биосфера успешно развивается и стабилизирует климат. Механизм Триединой структуры в этом режиме выступает в роли ненавязчивого, сбалансированного регулятора.

Дополнительное параметрическое исследование редуцированной модели позволило выявить критическую зависимость эффективности механизма от силы связи между биосферным триггером и орбитальной динамикой. Введение безразмерного коэффициента усиления связи γ показало, что при $\gamma = 1$ (оценка, соответствующая реальным физическим константам, таким как вклад биомассы в квадрупольный момент $J_2 \sim 10^{-10}$) планета эволюционирует под действием классических приливных сил, а механизм Триединой структуры выступает в роли мягкого, ненавязчивого стабилизатора.

Однако при гипотетическом экстремальном усилении связи ($\gamma = 10^6$) возникает нетривиальный динамический режим, который можно обозначить как «эффект избыточной стабилизации» (over-stabilization effect). В этом режиме обратная связь становится настолько жёсткой, что «замораживает» орбиту планеты на самой границе обитаемой зоны. Эта орбитальная ловушка лишает климатическую систему необходимой гибкости для развития положительных обратных связей, что в модели приводит к подавлению роста биомассы. Данный результат указывает на фундаментальный принцип: для долгосрочной обитаемости важна не максимальная

Парадокс перестабилзации: $\gamma = 1$ против $\gamma = 10^6$

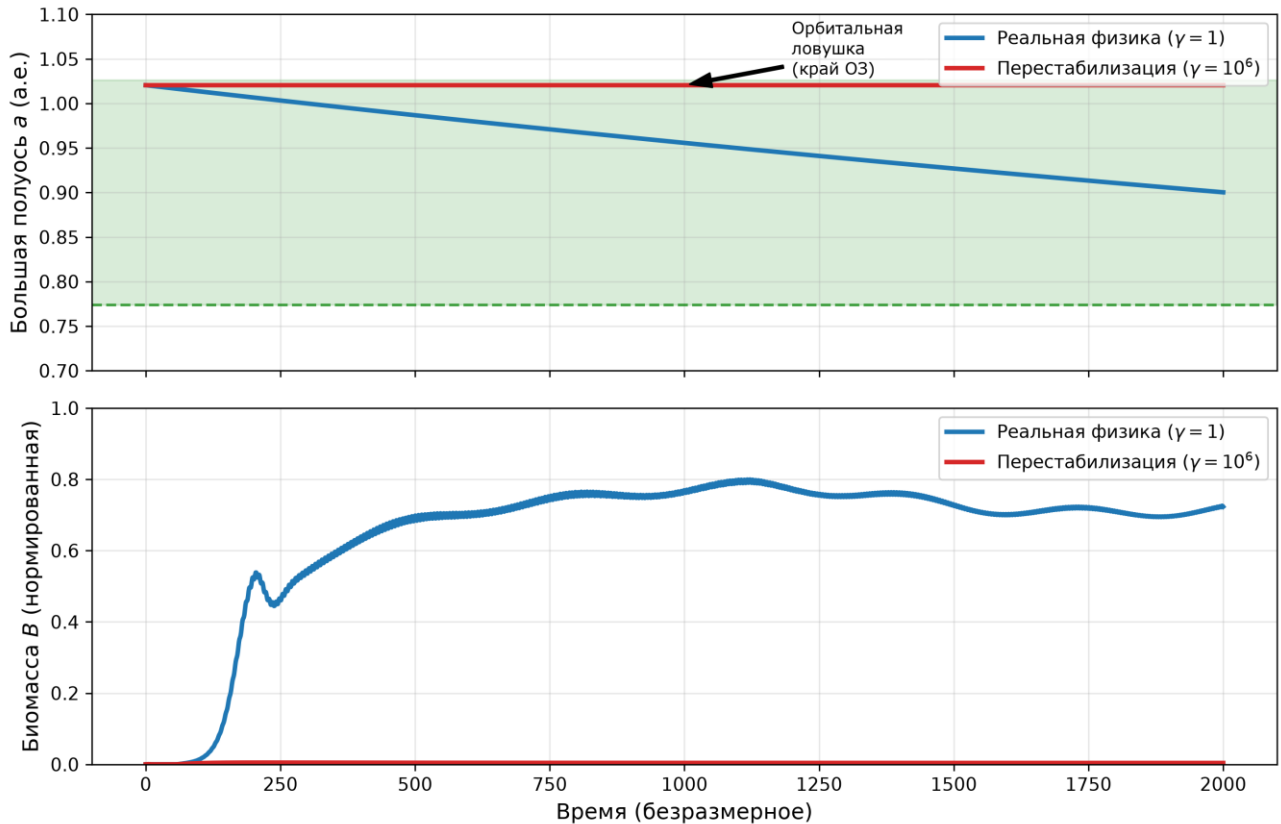


Рисунок 2. Параметрическое исследование силы биосферно-орбитальной связи и «парадокс перестабилзации». Верхняя панель: эволюция большой полуоси орбиты $a(t)$ (в а.е.). Зелёная штриховка обозначает обитаемую зону (ОЗ). Синяя кривая ($\gamma = 1$, реальная физика) демонстрирует естественный дрейф к центру ОЗ. Красная кривая ($\gamma = 10^6$, экстремальное усиление связи) показывает «орбитальную ловушку» на внешнем краю ОЗ. Нижняя панель: эволюция нормированной биомассы $B(t)$. При $\gamma = 1$ биосфера успешно развивается и достигает стационарного состояния ($B \approx 0.72$). При $\gamma = 10^6$ жёсткая орбитальная стабилизация подавляет климатическую адаптацию, что приводит к невозможности зарождения и развития биосферы ($B \rightarrow 0$). Результаты получены на полной физически обоснованной модели (v11.0) с эмпирическими начальными условиями.

сила связи, а её сбалансированность, позволяющая системе эволюционировать к оптимальным условиям, сохраняя при этом устойчивость к катастрофическим возмущениям. Однако при гипотетическом экстремальном усилении связи ($\gamma = 10^6$) возникает нетривиальный динамический режим, который можно обозначить как «эффект избыточной стабилизации» (over-stabilization effect). В этом режиме обратная связь становится настолько жёсткой, что «замораживает» орбиту планеты на самой границе обитаемой зоны. Эта орбитальная ловушка лишает климатическую систему необходимой гибкости для развития положительных обратных связей, что в модели приводит к подавлению роста биомассы. Данный результат указывает на фундаментальный принцип: для долгосрочной обитаемости важна не максимальная сила связи, а её сбалансированность, позволяющая системе эволюционировать к оптимальным условиям, сохраняя при этом устойчивость к катастрофическим возмущениям.

6.11.8. Ограничения редуцированной демонстрации

Одномерная топология узлов, кинематический характер триггера (6.11.10), эффективный коэффициент миграции k и отсутствие самосогласованного протопланетного диска являются осознанными упрощениями, допустимыми для доказательства концепции. Количественные значения k , δ и w не претендуют на наблюдательное соответствие и подлежат калибровке в полно-3D постановке задачи 8.3.6 на кластерных вычислениях.

Редуцированная демонстрация замыкает контур обратной связи исключительно через гравитационно-приливные каналы: приливный вход с квадрупольной угловой структурой $P_2(\cos \theta)$ и квадрупольный гравитационный отклик звезды J_2 . Электромагнитный канал звёздно-планетного взаимодействия (альфвеновские крылья, поток Пойнтинга, альфвеновский момент силы) в редуцированную систему не включён: альфвеновская физика представлена лишь внутренней динамикой резервуара (магнитное натяжение связей $C^{(k)}$), но не внешним каналом связи с планетой. Сигнал качества биосферы R_{bio} введён феноменологически как гладкая функция орбитального радиуса; модуляция чисел Лява приливного канала, предусмотренная основной моделью, в редуцированной версии приложена к выходному каналу и к скорости миграции, но не к амплитуде приливного входа. Учёт альфвеновских крыльев и самосогласованная модуляция приливной диссипации составляют предмет полно-3D постановки задачи 8.3.6.

Палеоклиматический и стресс-тестовый модули (разделы 6.11.9–6.11.12) замыкают обратные связи только на планетарном уровне (альбедо, углеродный цикл); звёздное звено контура

в них не вычисляется, а его вклад количественно ограничен γ -экспериментом (раздел 6.11.7): при реальных константах резервуар-опосредованная орбитальная связь пренебрежимо мала. Прямые и обратные метаканалы (разделы 6.12–6.14, Приложение 2) в редуцированных демонстрациях не вычисляются; их совместное действие составляет предмет задачи 8.3.11 и иерархии Tier-2. Совместное вычисление резервуара, климата и орбитальной динамики в полной размерной формулировке составляет задачу 8.3.6.

Иерархия моделирования (Tier 0–3). Tier 0 — нульмерный энергетический баланс с биосферной обратной связью (палеоклиматический бенчмарк, стресс-тест); Tier 1 — лоренцевский резервуар как ROM звёздной конвекции (Рис. 1, 2, 6, 7); Tier 2 — гиперграф $6N+14$ ОДУ с 18 каналами, двухуровневой биосферой и спутником по спецификации Приложения 2 (задачи 8.3.11, 8.3.7); Tier 3 — полно-3D МГД с N -телами (задача 8.3.6). Каждая ступень наследует предсказания нижней и добавляет собственные фальсификаторы.

Важное методологическое ограничение (обновлённая формулировка). Ранние попытки применения нульмерной климатической модели к эмпирическим палеоданным выявили два класса артефактов: перевёрнутое во времени расписание форсинга (светимость и CO_2) и двойной учёт быстрых обратных связей через температурно-зависимый парниковый член с усилением больше единицы. После калибровки (линеаризованный закон Клаузиуса–Клапейрона с усилением 0.8 и привязкой современной точки к 288 К; расписание форсинга в координатах возраста) нульмерный модуль воспроизводит первопорядковые черты палеоклимата (архейское метановое тепло, провал после Великого кислородного события, криогеновые оледенения, фанерозойское плато) и служит корректным стендом для стресс-тестов. Остаточные ограничения — отсутствие широтного разрешения и эндогенного углеродного цикла в полной форме — обосновывают переход к Tier-2 и сопряжению с моделями общей циркуляции (PlaSim, cGENIE) в задаче 8.3.6.

6.11.9. Расчёт с использованием эмпирических данных на палеоклиматических масштабах

Эмпирический бенчмаркинг на палеоклиматических масштабах. Для проверки способности биосферной обратной связи демпфировать долгосрочные климатические возмущения была проведена симуляция эволюции планеты на масштабе 4,5 млрд лет. В качестве внешних граничных условий использовались эмпирические реконструкции светимости звезды (Gough, 1981) и концентрации CO_2 , включая импульсы от траппового вулканизма (Large Igneous

Provinces). Во избежание артефактов численного интегрирования система дифференциальных уравнений (включая тепловую инерцию океана $\tau_{\text{therm}} \sim 5$ млн лет и инерцию биогеографической перестройки альбеда $\tau_{\text{bio}} \sim 50$ млн лет) решалась адаптивным методом Рунге–Кутты 8-го порядка (DOP853) с относительной точностью 10^{-8} на сверхплотной сетке (шаг 250 тыс. лет). Климатический модуль калиброван так, что современная конфигурация ($L = 1$, $C = 400$ ppm, $A = 0.30$) воспроизводит $T = 288.0 \pm 0.5$ K; быстрые обратные связи учтены однократно (линеаризованный закон с усилением 0.8), что исключает двойной учёт водно-парового усиления.

В калиброванной конфигурации с единичным усилением климатической обратной связи биотическое демпфирование экзогенных ударных возмущений статистически неразличимо с нулём: полномочие альбедной петли ($|\Delta A| \leq 0.10$) на порядок меньше амплитуд экзогенных импульсов. Существенный стабилизирующий вклад в этой конфигурации даёт спутник: подавление хаоса обликвити снижает дисперсию температуры на 12% и увеличивает пост-каскадную биомассу на 23%. Количественная оценка биотического демпфирования требует эндогенного углеродного цикла и широтного разрешения (задачи 8.3.6, 8.3.7).

6.11.10. Стохастический стресс-тест и контрфактическое ветвление

Для оценки устойчивости системы к катастрофическим возмущениям построен стохастический каталог событий с частотами, согласованными с палеорекордом: импакты класса Чиксулуба (~ 0.8 /млрд лет, кратерная летопись), трапповые эпизоды (~ 1.5 /млрд лет), близкие сверхновые в пределах 100 пк (~ 1 /млрд лет), экстремальные супервспышки (~ 2 /млрд лет, статистика Kepler по солнечным звёздам); оледенения заданы детерминированно в криогеновых эпохах ($t \approx 3.78$ и 3.85 млрд лет). События моделируются аналитическими экспоненциальными ядрами (аэрозольное альбеда, инъекция CO_2 , множитель смертности) и разрывными киками биомассы, применяемыми на границах кусочного интегрирования; интегрирование — адаптивное (DOP853) с локальным измельчением шага до 100 лет внутри окон событий. В момент каждого крупного события от текущего состояния отпочковывается контрфактическая ветвь с отключённой биосферной регуляцией (метод абляции с ветвлением): обе ветви испытывают один и тот же удар, различаясь лишь восстановлением.

Во всех 16 ветвях отклонение температуры при включённом механизме не превышает контрольное: в 8 событиях выигрыш строгий (от 2 до 13 K), в остальных — паритет в пределах округления; ни в одном событии механизм не ухудшил исход. Эффект отсутствует (i) для стерилизующих импактов, где обратная связь обесточена гибелью биосферы, и (ii) в архее, где

биомасса мала и регуляция пропорционально слаба; оба ограничения физически ожидаемы и указывают, что «щит» функционирует только совместно с живой биосферой.

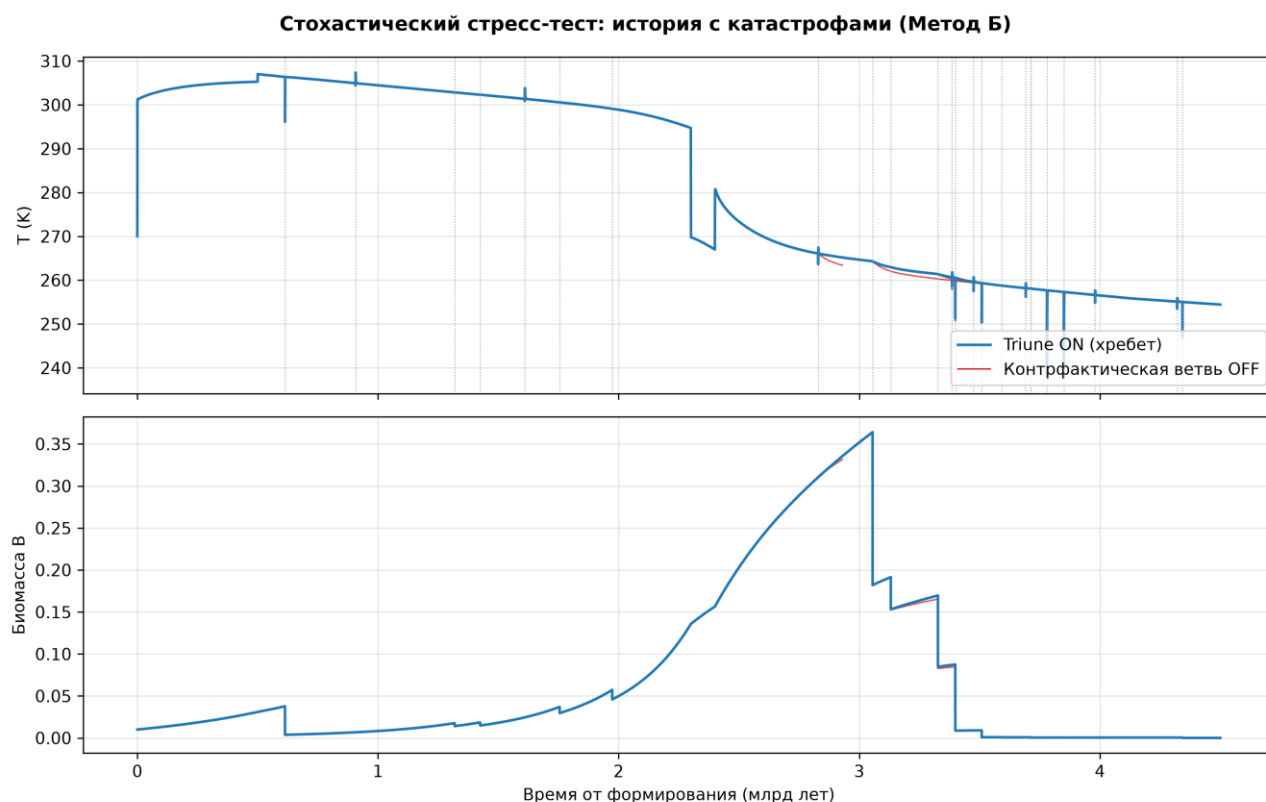


Рисунок 3. Палеоклиматический бенчмаркинг: четыре контрольные линии за 4.5 млрд лет. Верхняя панель: температура $T(t)$ — Baseline (без катастроф, чёрный штрих), OFF (события при отключённой регуляции, красный), ON (события при включённой биосферной регуляции, синий), ON+Moop (то же с подавлением обликвитного шума спутником, зелёный). Нижняя панель: биомасса $B(t)$ тех же сценариев; пики вымираний соответствуют ударным событиям каталога.

Стресс-тест выявляет три необходимых условия направленной стабилизации: (i) докритическая скорость миграции ($\tau_{\text{trans}} \gtrsim \tau_{\text{bio}}$); (ii) достаточная чувствительность триггера (порог K); (iii) непрерывность биосферной затравки через до-обитаемую стерилизующую фазу. Условие (iii) обеспечивается механизмом двухуровневой биосферы с рефугиями (термофильная ветвь с $T_{\text{opt}} = 353 \text{ K}$, $T_{\text{max}} = 395 \text{ K}$ по Kashefi & Lovley 2003; утечка рефугиев при $T < 333 \text{ K}$); термофилия ранней биосферы рассматривается как сценарная ветвь, согласованная с дискуссией о

природе LUCA (Weiss et al. 2016; Groussin et al. 2013; против: Galtier et al. 1999), а не как посылка модели.

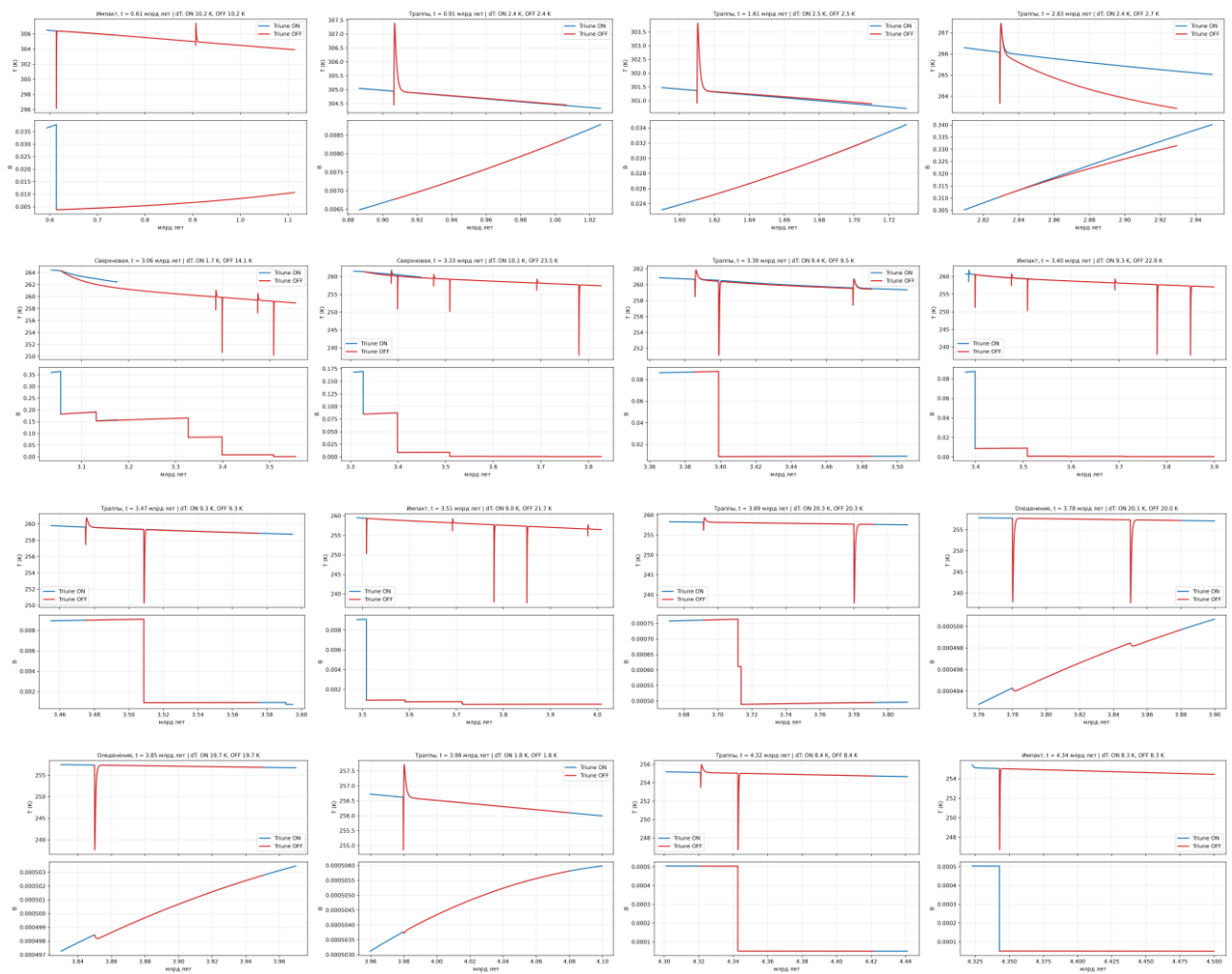


Рисунок 4. Мастер-график стресс-теста: ON-хребет (синий) и контрфактические OFF-ветви (красный) для 16 событий; вертикальные пунктиры — моменты событий; панели $T(t)$ и $B(t)$.

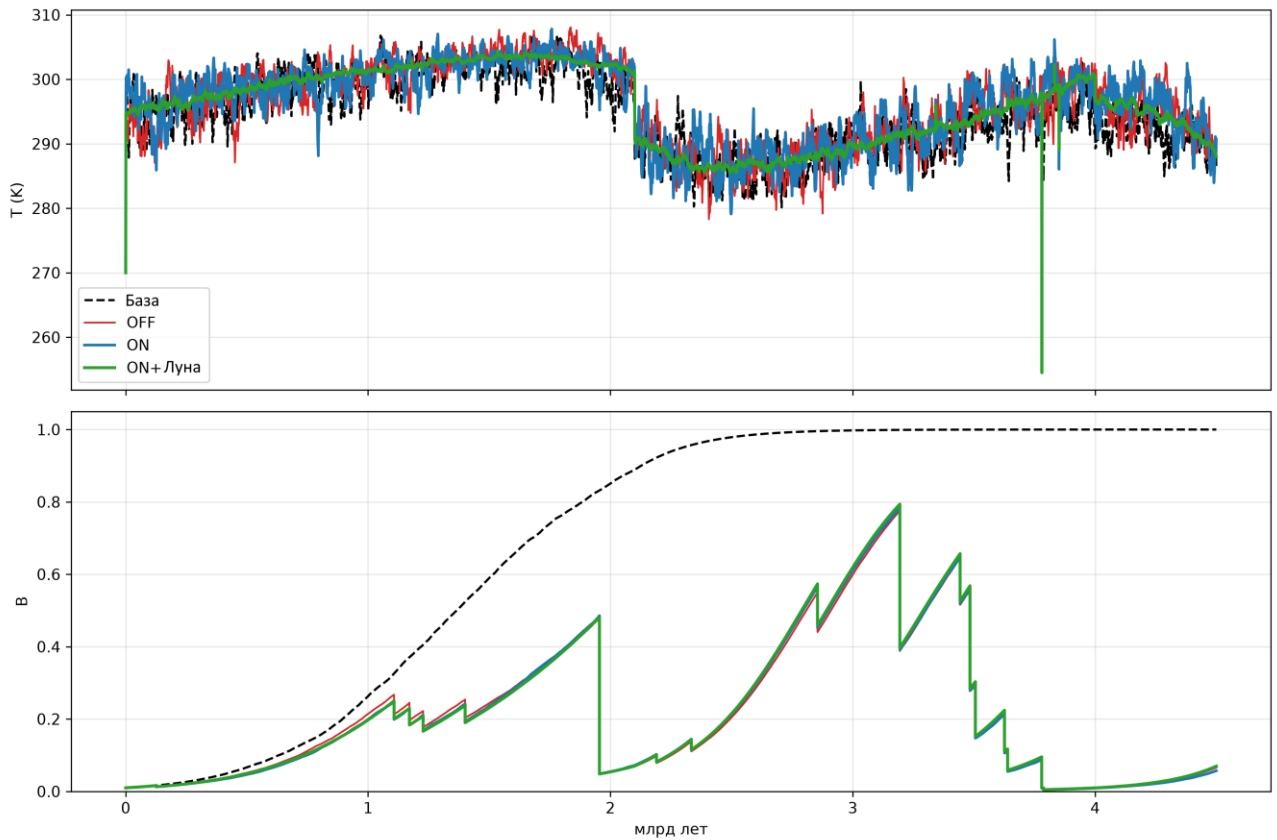


Рисунок 5. Репрезентативные кризисные окна (траппы 2.83 млрд лет; импакт 3.40 млрд лет): температура и биомасса, ON против OFF; аннотации указывают тип события, амплитуду и пост-событийный дрейф, при котором наблюдается различие режимов.

6.11.11. Замкнутый контур с живой биосферой: двухуровневая модель и порог захвата

Замкнутый контур (резервуар $\rightarrow J_2$ и подавление миграции $\rightarrow$ орбита $\rightarrow$ инсоляция $\rightarrow$ климат $\rightarrow$ двухуровневая биосфера с рефугиями $\rightarrow$ триггер) демонстрирует порог по скорости миграции: при $\kappa = 10^{-3}$ планета пересекает обитаемую зону транзитом и покидает систему с вымерзанием поверхностной биосферы; при $\kappa = 3 \cdot 10^{-4}$ и 10^{-4} возникает захват с $|a - 1| \leq 0.04$. Реализуются два аттрактора биосферного режима: мезофильный ($a \approx 1.03\text{--}1.04$, $T \approx 285\text{--}288$ K, остаточная термофильная ветвь $7 \cdot 10^{-3}$) и тёплый режим термо-мезофильного сосуществования ($a \approx 0.964$, $T \approx 300\text{--}305$ K, $B_{th} \approx 0.87$). Непрерывность биосферной затравки через до-обитаемую стерилизующую фазу обеспечивается механизмом, а не допущением: термофильная ветвь удерживает биомассу во внутренней фазе, рефугии мостят переход при $T < 333$ K, мезофильная ветвь развёртывается из утечки. Спутник снижает дисперсию температуры в захваченных

режимах в 2.5 раза и более за счёт подавления обликвитного шума. Планета-возмущатель без биосферы мигрирует свободно ($a_B \approx 2.3$), подтверждая резонансную селективность механизма.

Таблица 6.11.2. Конфигурации связанного эксперимента.

Конфиг	κ	γ	Луна	$a_A(\text{end})$	B_{me}	B_{th}	varT	Режим
A	1e-3	1	—	118.5	0	0	0.6	транзит, вымерзание
B	3e-4	1e4	—	1.041	1.000	0.007	0.5	мезофильный захват
B+Moon	3e-4	1e4	+	1.030	1.000	0.008	0.2	мезофильный захват
D	1e-4	1e4	—	0.964	1.000	0.868	0.3	тёплый захват
D+Moon	1e-4	1e4	+	0.964	1.000	0.871	0.0	тёплый захват

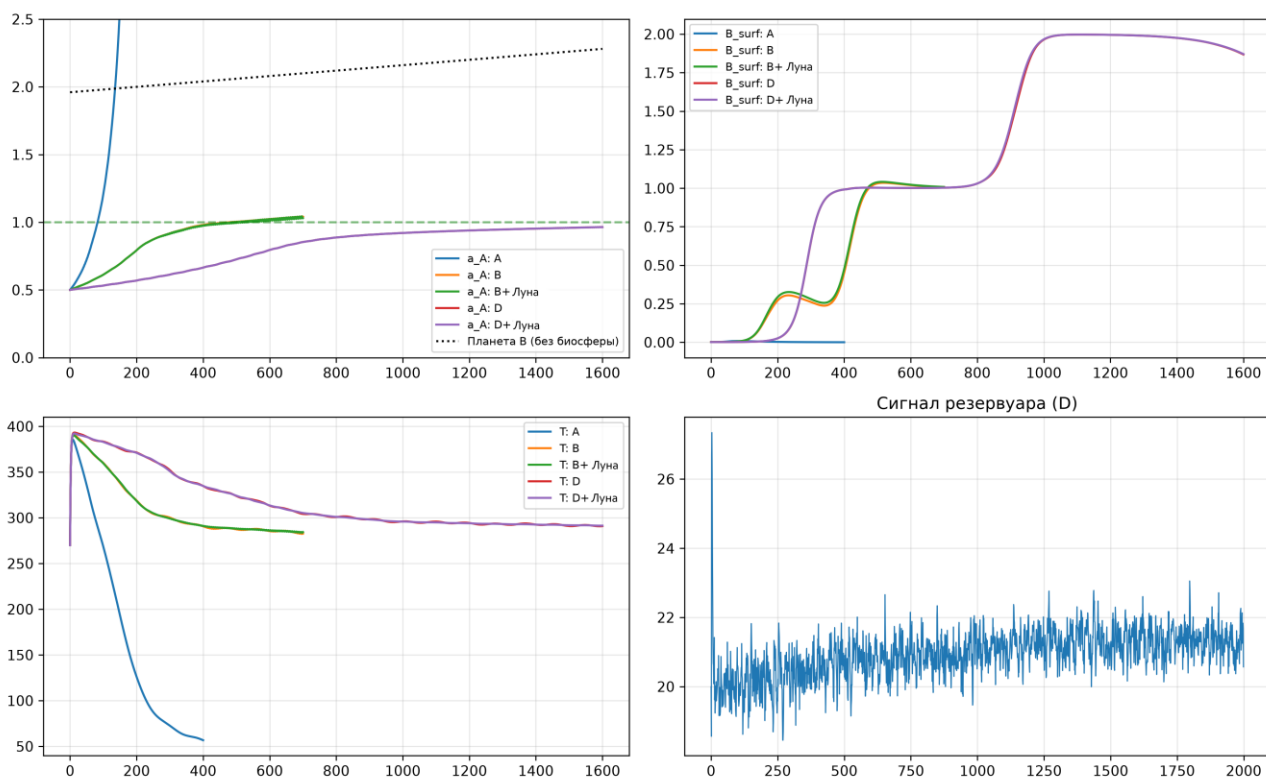


Рисунок 6. Замкнутый контур с живой двухуровневой биосферой. (а) Орбиты конфигураций А–Е и свободная миграция возмущателя (пунктир); (б) поверхностная биомасса: термофильный пик во внутренней фазе, рефугиальный мост при проходе 333 К, мезофильный взлёт в обитаемой зоне; (с) температура; (д) эмерджентный сигнал резервуара (среднее Z).

6.11.12. Свип по γ : вырождение окна стабилизации

Для разделения вкладов триггерного (подавление миграции множителем $(1-R_{\text{bio}})$) и квадрупольного ($J_2 = \gamma(W_{\text{out}} \cdot Z) \cdot R_{\text{bio}}$) каналов выполнен свип $\gamma \in \{0, 1, 10^2, 10^4, 10^6\}$ при двух темпах миграции с предрегистрированными предсказаниями. Захват наблюдается при всех γ , включая $\gamma = 0$ ($a_{\text{mean}} = 1.036$ при $\kappa = 3 \cdot 10^{-4}$; 0.960 при $\kappa = 10^{-4}$), что подтверждает γ -независимость триггерного канала: квадрупольный канал не является необходимым для направленной стабилизации в разрешении редуцированной модели. $\text{std}(a)$ за последние 200 единиц идентична при $\gamma = 0-10^2$ (0.0038) и возрастает лишь маргинально при $\gamma = 10^4$ (0.0042): нефильтрованный считыватель резервуара, приложенный к радиальной силе, инжектирует быстрый шум вместо добавления жёсткости удержания. Низкочастотная фильтрация считывателя, требуемая предсказанием Tier-2, опирается на три физических механизма: секулярное фазовое усреднение, оставляющее лишь компоненту квадруполья, когерентную с $m \cdot n$ (Murray & Dermott 1999; эквивалент множителя $\sin \Delta\phi$ раздела 6.7); оболочку магнитного цикла, ограничивающую скорость апплгейтовского перераспределения массой периодом τ_{cycle} (Applegate 1992 [114]; Lanza & Rodonò 1999 [115]); и альфвеновско-конвективное время отклика оболочки как нижнюю границу. Постоянная $\tau_{\text{filter}} = \max(\tau_{\text{cycle}}, Q_{\text{res}}/(m \cdot n))$ тем самым является наблюдаемым звёздным параметром, а не численным артефактом. При $\gamma = 10^6$ режим сменяется избыточной стабилизацией: защемление у внутренней кромки триггера ($a_{\text{mean}} = 0.950$), тридцатикратный рост $\text{std}(a)$ и varT , термофильный сдвиг биосферы ($B_{\text{th}} = 0.584$ против $B_{\text{me}} = 0.191$). Окно стабилизации по γ вырождается в $[0, \gamma_{\text{over}})$ с $\gamma_{\text{over}} \approx 10^5-10^6$: направленная стабилизация робастна к полному отсутствию квадрупольного канала и разрушается его переусилением. Селекция биосферного режима (мезофильный против тёплого аттрактора) управляется темпом миграции κ и не зависит от γ .

Таблица 6.11.3. Свип по γ : метрики захвата и удержания.

Конфиг	κ	γ	a_{mean}	$\text{std}(a)$	B_{me}	B_{th}	varT	Режим
g0_k3e-4	3e-4	0	1.036	0.0038	1.000	0.007	0.5	мезофильный захват
g1_k3e-4	3e-4	1	1.036	0.0038	1.000	0.007	0.5	мезофильный захват
g1e2_k3e-4	3e-4	1e2	1.036	0.0038	1.000	0.007	0.5	мезофильный захват
g1e4_k3e-4	3e-4	1e4	1.032	0.0042	1.000	0.007	0.5	захват + маргинальная накачка
g1e6_k3e-4	3e-4	1e6	0.950	0.1157	0.191	0.584	14.4	избыточная стабилизация
g0_k1e-4	1e-4	0	0.960	0.0026	1.000	0.868	0.3	тёплый захват

Конфиг	κ	γ	a_{mean}	$\text{std}(a)$	B_{me}	B_{th}	varT	Режим
glе4_k1e-4	1e-4	1e4	0.960	0.0026	1.000	0.868	0.3	тёплый захват

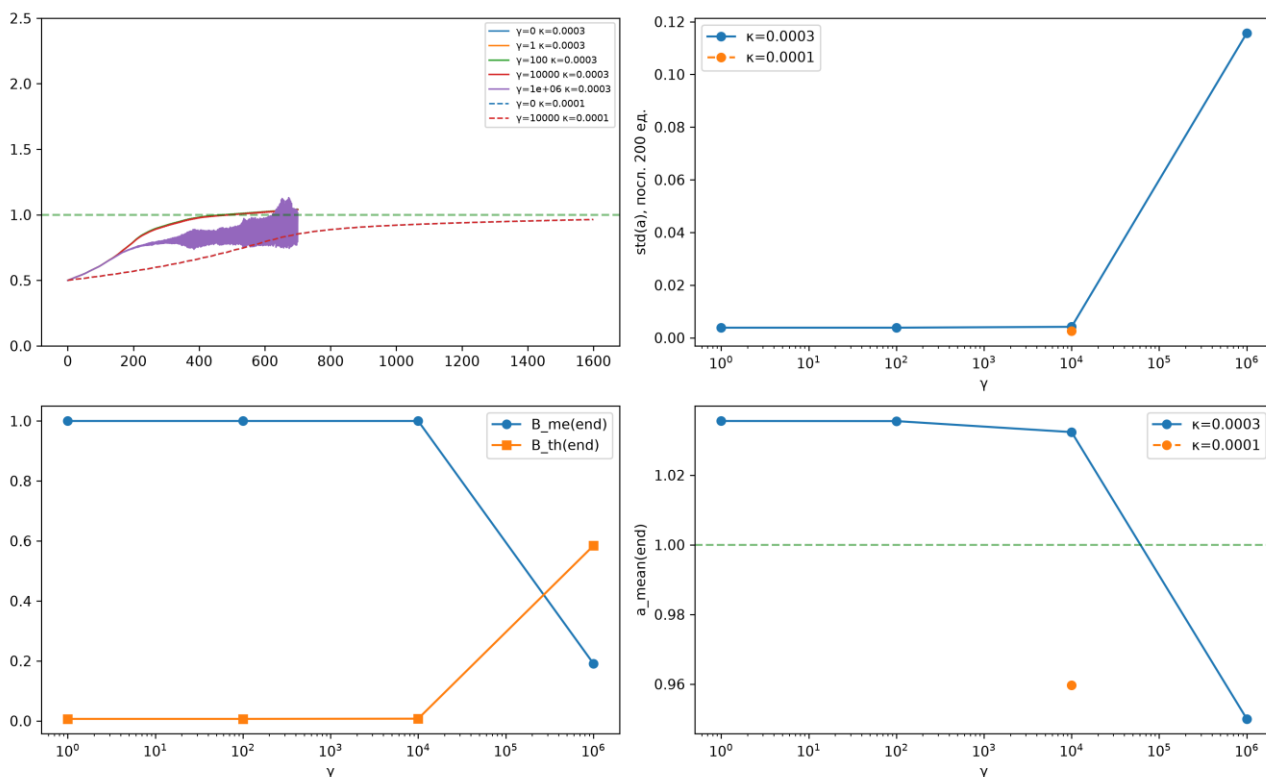


Рисунок 7. Слип по γ . (а) Траектории $a_D(t)$ семи конфигураций (сплошные $\kappa = 3 \cdot 10^{-4}$, штриховые $\kappa = 10^{-4}$; фиолетовая полоса — режим избыточной стабилизации); (b) $\text{std}(a)$ последних 200 единиц против γ : пол до 10^4 и скачок при 10^6 ; (с) конечные B_{me} и B_{th} против γ : инверсия доминирования ветвей при 10^6 ; (d) $a_{\text{mean}}(\text{end})$ против γ с линией центра обитаемой зоны. Лог предрегистрации предсказаний депонируется как дополнение (п. 8.4.3).

Закрыв численный корпус редуцированных демонстраций, перейдём к формулировке проверяемых гипотез программы.

6.11.13. Операциональный дискриминатор обучения и релаксации.

Система квалифицируется как обучающаяся, если её отклик на идентичный вход зависит от истории (предобучения), и как релаксирующая, если отклик есть функция только текущего состояния. Предрегистрированы три теста на моделях Tier-1/Tier-2. **T1 (зависимость от предобучения)**: считыватель обучается на данных слепого сканирования двух различных миграционных историй ($\kappa_1 \neq \kappa_2$ либо различные реализации шума); на идентичном тестовом приливном входе разность выходов Δu сравнивается с шумовым полом; предсказание: Δu значимо выше

пола при сохранённом ESP. **T2 (контрастивное правило без внешнего учителя):** пара контрфактических ветвей (6.11.10) играет роли свободного и зажатого состояний; медленная переменная (эффективное усиление γ либо вязкость мантии) обновляется правилом $\Delta w = -\eta(D_{\text{OFF}} - D_{\text{ON}})$; предсказание: сходимость к конфигурации, минимизирующей D при условии персистентности биосферы ($B > 0.5$), то есть самонастройка без внешней цели. **T3 (последовательный отбор):** ансамбль из 100 конфигураций со случайными медленными переменными; селекция по выживанию биосферы на 1 Gyr; предсказание: распределение выживших смещено к стабилизирующим конфигурациям (KL-дивергенция от априорного > 0) при отсутствии направленности в самой динамике. Фальсификатор интерпретации «обучение»: провал любого из T1–T3 при сохранённом ESP — в этом случае система квалифицируется как сложная релаксация, и программа сохраняет ценность строгого отрицательного результата.

7. Гипотезы

Настоящая программа формулирует 27 проверяемых гипотез, организованных в пять групп: нулевые и контрольные гипотезы (H0), Триединая структура (H1), самоорганизация вещества при сверхэкстремальных условиях (H2), самообучение вещества при сверхэкстремальных условиях (H3) и взаимодействие подсистем Триединой структуры (H4). Каждая гипотеза сопровождается явным фальсификатором.

Н0. Нулевые и контрольные гипотезы

H0 – Апофеническая нулевая. Формулировка: все явления объясняются стандартной физикой; совпадения отражают принадлежность к классу универсальности. Фальсификатор: систематическая неспособность нулевых моделей воспроизвести зависящий от истории отклик.

Н1. Триединая структура

H1 – Триединая структура звезда–планета(спутник)–биосфера. Формулировка: космические объекты со сверхэкстремальными условиями (звёзды, компактные объекты, планеты и крупные спутники) и биосфера образуют связанную систему с обратными связями, функционирующую как единая самообучающаяся макроструктура. Фальсификатор: отсутствие корреляций между параметрами различных компонентов системы в больших выборках.

H1.1 – Направленная стабилизация через биосферный триггер. Формулировка: Триединая структура звезда–планета(спутник)–биосфера демонстрирует направленную стабилизацию условий в зоне обитаемости. Биосфера выступает в роли «глобального триггера»: через свои

макропроявления (состав атмосферы, альбедо, биогеохимические циклы) она обеспечивает не-тривиальный сигнал качества R, который стимулирует систему модифицировать медленные переменные (через резонансное захватывание, изменение чисел Лява и мультиквadrupольных моментов) для обеспечения дальнейшего развития биосферы. Подстройка планеты является многопараметрической: помимо стабилизации орбиты, система может корректировать скорость вращения, осевой наклон, орбиты спутников и магнитное поле. Мультиквadrupольный момент звезды обеспечивает механизм персонализированного воздействия на конкретную планету через резонансную селективность, а при наличии нескольких мультипольных каналов — потенциально на несколько планет одновременно. Фальсификатор: 1. N-body симуляции показывают, что скачок k_2 не способен удержать резонанс на фоне гравитационного шума. 2. Отсутствие скоплений (pile-ups) периодов экзопланет на частотах звёздных g-мод. 3. Отсутствие корреляции между мультипольными моментами звёзд и параметрами планет в экзопланетных системах.

H1.2 – Коллективность гиперграфа каналов. Формулировка: направленная стабилизация является коллективным эффектом гиперграфа каналов: никакое собственное подмножество каналов не воспроизводит стабилизацию, достигаемую полным набором. Фальсификатор: существование абляционного подмножества, воспроизводящего метрики полной сети в пределах ошибки (проверка на модели Tier-2, задача 8.3.11).

H1.3 – Триггерное усиление. Формулировка: фазово-когерентный планетарный форсинг (приливный и альфвеновский) способен высвободить запасённую свободную энергию звезды с усилением 10^2 – 10^4 в квадрупольном канале посредством известных механизмов (резонансная фиксация, инверсный каскад, захват ТНО), не требуя энергии от самого сигнала. Фальсификатор: отсутствие орбитально-фазированных астросейсмических или активностных сигнатур с амплитудой, предсказанной поканальной композицией, в системах, где резонансные условия заведомо выполнены; либо наблюдательное превышение бюджетом Ланзы любого такого отклика.

H2. Самоорганизация вещества при сверхэкстремальных условиях

H2 – Самоорганизация нейросетевых структур. Формулировка: в космических объектах со сверхэкстремальными условиями вещество способно самоорганизовываться в структуры, топологически аналогичные нейронным сетям, с метастабильными состояниями узлов, связями переменной силы и пороговой динамикой. Фальсификатор: отсутствие топологических

признаков сетевой структуры в численных моделях и наблюдательных данных для всех перечисленных сред.

Н2.1 – Топологическая самоорганизация в классических звёздах. Формулировка: конвективные ячейки, магнитные поля и осцилляционные моды в звёздах главной последовательности и гигантах самоорганизуются в сетевые структуры с дискретными состояниями и пороговой динамикой. Фальсификатор: отсутствие сетевой топологии в численных моделях звёздной конвекции.

Н2.2 – Топологическая самоорганизация в компактных объектах. Формулировка: ядерная паста, вихрево-флюксонидные сети и доменные структуры в нейтронных звёздах и белых карликах образуют сетевые структуры с метастабильными состояниями и топологическими дефектами. Фальсификатор: отсутствие сетевой организации в моделях нейтронных звёзд и белых карликов.

Н2.3 – Топологическая самоорганизация в планетах. Формулировка: геодинамо, мантийная конвекция и фазовые переходы в планетах земной группы, газовых и ледяных гигантах формируют сетевые структуры с дискретными состояниями. Фальсификатор: отсутствие сетевых признаков в моделях планетарных недр.

Н2.4 – Резервуарная функциональность звёзд. Формулировка: осцилляционные моды звёзд демонстрируют свойства резервуара: эхо-состояние, разделение и затухающую память. Фальсификатор: отсутствие эхо-состояния в отклике звёзд на возмущения.

Н2.5 – Резервуарная функциональность компактных объектов. Формулировка: ядерная паста и вихревые сети нейтронных звёзд, кристаллические домены белых карликов демонстрируют свойства резервуара. Фальсификатор: отсутствие затухающей памяти в глитчах нейтронных звёзд.

Н2.6 – Резервуарная функциональность планет. Формулировка: геодинамо и мантийная конвекция планет демонстрируют свойства резервуара. Фальсификатор: отсутствие резервуарных свойств в магнитном поле планет.

Н2.7 – Резервуарная функциональность микробных сообществ. Формулировка: микробные консорциумы с рекуррентной трофической структурой демонстрируют измеримые резервуарные свойства: эхо-состояние (сходимость траекторий состава сообщества после снятия возмущения), разделение (дискриминация температурных и субстратных входов траекториями состава) и затухающую память (ёмкость памяти $MC \geq 1$ при реконструкции задержанного

входа по биогеохимическому выходу). Фальсификатор: отсутствие ESP, разделения и памяти в контролируемых микрокосм-экспериментах с консорциумами, обладающими рекуррентными трофическими связями, при тех же входных сигналах; либо наличие идентичных метрик у контрольных консорциумов без рекуррентных связей.

Н3. Самообучение вещества при сверхэкстремальных условиях

Преамбула. Самообучение в смысле уравнения (2) требует наличия нетривиального сигнала качества R . Для системы звезда–планета этот сигнал обеспечивается биосферой (см. Н1.1 — направленная стабилизация через биосферный триггер). В изолированных космических объектах источник R может возникать из термодинамических градиентов или метастабильных состояний. Частные гипотезы Н3.1–Н3.4 описывают конкретные механизмы самообучения при наличии такого сигнала.

Н3 – Самообучение нейросетевых структур. Формулировка: нейросетевые структуры в космических объектах со сверхэкстремальными условиями демонстрируют двухмасштабную динамику с правилом модификации медленных переменных под воздействием сигнала качества R . Фальсификатор: отсутствие двухмасштабной динамики с правилом модификации в численных моделях и наблюдательных данных.

Н3.1 – Самообучение звёзд. Формулировка: взаимодействие конвективных ячеек, магнитных полей и осцилляционных мод звёзд демонстрирует двухмасштабную динамику с правилом модификации медленных переменных. Фальсификатор: отсутствие правила модификации в звёздной активности.

Н3.2 – Самообучение компактных объектов. Формулировка: Нейтронные звёзды и белые карлики демонстрируют самообучение через вихревой и сейсмический каналы. Температурно-зависимая пластичность: скорость модификации весов вихревой сети зависит от температуры через нейтринное охлаждение [89, 90], проявляясь в статистике глитчей. Важное разведение контекстов: нейтринное охлаждение здесь является внутренним термодинамическим процессом компактного объекта, модулирующим пластичность его внутренней сети. Это принципиально отличается от отвергнутого в разделе 4.2.1 нейтринного канала обратной связи «планета → звезда», который предполагал передачу информации между различными объектами через нейтринный поток. В Н3.2 нейтрино не переносят информацию между объектами, а лишь определяют внутреннюю температурную эволюцию, которая, в свою очередь, модулирует

пластичность внутренней сети. Фальсификатор: Статистика восстановления после глитчей не зависит от термической стадии; отсутствие признаков обучения в эволюции пульсаров.

Н3.3 – Самообучение планет. Формулировка: геодинамо, мантийная конвекция и тектоника планет демонстрируют адаптивное поведение с правилом модификации медленных переменных. Фальсификатор: отсутствие адаптивного поведения в геологических процессах.

Н3.4 – Самовлияние каналов обратной связи внутри объекта. Формулировка: каналы обратной связи внутри космического объекта могут влиять на самообучение других частей того же объекта. Например, нейтрино из одной части звезды может вызывать каскадные реакции в другой части той же звезды; вихри в нейтронной звезде могут модулировать флюксоиды; сейсмические волны в планете могут модулировать фазовые переходы в мантии. Фальсификатор: отсутствие корреляций между динамикой различных частей объекта.

Н4. Взаимодействие подсистем Триединой структуры

Н4 – Взаимодействие подсистем Триединой структуры. Формулировка: подсистемы Триединой структуры (звезда, планета, компактный объект, биосфера) взаимодействуют через каналы обратной связи, обеспечивая обучение через взаимодействие. Фальсификатор: отсутствие корреляций между параметрами различных подсистем.

Н4.1 – Звезда → планета. Формулировка: звезда влияет на планету через приливные резонансы с внутренними g-модами, «крылья Альфвена» и звёздный ветер, модулируя внутреннюю структуру планеты. Фальсификатор: отсутствие корреляции звёздной активности с планетарными параметрами.

Н4.2 – Планета → звезда. Формулировка: планета влияет на звезду через приливные воздействия и модуляцию динамо, модифицируя внутреннюю структуру звезды. Фальсификатор: отсутствие орбитально-фазированных сигналов на звезде. Примечание: нейтринный канал (геонейтрино) был строго отвергнут в разделе 4.2.1 и не включён в данную гипотезу.

Н4.3 – Компактный объект → планета. Формулировка: компактный объект (нейтронная звезда, белый карлик) влияет на планету через гравитационные, магнитные каналы и радиацию, модулируя внутреннюю структуру планеты. Фальсификатор: отсутствие влияния пульсара на планеты-компаньоны.

Н4.4 – Планета → компактный объект. Формулировка: планета влияет на компактный объект через геонейтрино (каскадные эффекты в ядерной пасте) и аккрецию вещества,

модифицируя внутреннюю структуру компактного объекта. Фальсификатор: отсутствие корреляции глитчей с планетами-компаньонами.

Н4.5 – Звезда → биосфера. Формулировка: звезда влияет на биосферу через УФ-излучение, космические лучи и звёздный ветер, модулируя эволюционные процессы. Фальсификатор: отсутствие корреляции звёздных циклов с биосферными.

Н4.6 – Биосфера → звезда. Формулировка: биосфера влияет на звезду опосредованно через планету: изменение альбедо, приливные воздействия, состав атмосферы. Фальсификатор: отсутствие влияния биосферы на звезду.

Н4.7 – Планета → биосфера. Формулировка: планета влияет на биосферу через климат, тектонику, магнитное поле и вулканизм. Фальсификатор: отсутствие влияния геологических процессов на биосферу.

Н4.8 – Биосфера → планета. Формулировка: биосфера влияет на планету через биогеохимические циклы, выветривание и резонанс Шумана, модифицируя медленные переменные планетарной сети. Фальсификатор: отсутствие влияния биосферы на планетарные процессы.

Завершив формулировку гипотез, далее предложим конкретную программу их проверки.

8. Исследовательская программа

Далее предлагается примерная исследовательская программа, структурированная по четырём направлениям: лабораторные исследования, наблюдательные исследования, теоретические исследования и инфраструктура. Для каждого направления указаны конкретные задачи, метрики успеха и реалистичные временные рамки. Программа сознательно не ограничена задачами, выполнимыми на основе существующих или строящихся инструментов. Задачи, требующие принципиально новых методик, отмечены в соответствующих подразделах как долгосрочные перспективы с указанием ожидаемого горизонта выполнения.

8.1. Лабораторные исследования

8.1.1. Резервуарные свойства экстремальных сред (Н2, Н3)

Численное моделирование ядерной пасты. Моделирование ядерной пасты методами молекулярной динамики и Монте-Карло с использованием потенциалов, согласованных с функционалом плотности. Подача внешних возмущений (деформация, магнитное поле) и измерение

отклика. Анализ результирующих структур методами теории графов: распределение степеней узлов, коэффициент кластеризации, средняя длина пути. Метрика успеха: наличие признаков резервуарной функциональности (нелинейное разделение состояний, эхо-состояние в численном эксперименте). Сроки: 1–3 года. Реалистичность: высокая.

Самообучающиеся резисторные сети. Воспроизведение экспериментов [28] с пассивными резисторными сетями и расширение их на трёхмерные конфигурации с целью проверки гипотезы НЗ. Метрика успеха: наблюдение обобщения при наличии нетривиального сигнала качества R и его отсутствие при тривиальном R . Сроки: 1–2 года. Реалистичность: высокая.

Суперионный лёд — долгосрочная перспектива. Прямой физический эксперимент с суперионным льдом при давлениях 50–200 ГПа и температурах 3000–5000 К, с подачей модулированного входного сигнала и регистрацией отклика, требует создания установок, способных поддерживать эти условия в течение времени, достаточного для многократных измерений (секунды и более). Современные методы лазерного нагрева в алмазных наковальнях обеспечивают время жизни образца порядка микро- или миллисекунд, что недостаточно для проверки свойства эхо-состояния. Выполнение этой задачи станет возможным либо с развитием методов сверхбыстрой рентгеновской дифракции с модулированным возбуждением, либо с созданием установок нового поколения для статического сжатия. Данная задача рассматривается как долгосрочная перспектива, требующая либо принципиально новых экспериментальных методик, либо замены физического эксперимента численным моделированием методом молекулярной динамики. Сроки численного моделирования: 3–5 лет; физического эксперимента — не ранее 10–15 лет. Реалистичность: средняя для численного моделирования, низкая для прямого физического эксперимента.

8.1.2. Лавинная динамика и память (Н2, Н3)

Закреплённая вихревая материя. Эксперименты со сверхпроводниками второго рода (например, NbSe_2 , YBCO) в режиме закреплённых вихрей: приложение модулированного магнитного поля, измерение магнитной восприимчивости и акустической эмиссии. Анализ статистики лавин: распределения размеров, времён ожидания, коэффициента ветвления σ_{branch} . Метрика успеха: соответствие степенным законам с показателями, близкими к нейронным лавинам [36, 37], и наличие старения. Сроки: 2–3 года. Реалистичность: высокая.

8.1.3. Резервуарные метрики микробных микрокосмов (H2.7)

Хемотростатные/микромикроскоп-эксперименты с консорциумами из 3–5 гильдий с рекуррентными трофическими связями (фотоавтотрофы → аэробы → метаногены → синтрофы). Входной сигнал: импульсы температуры, pH и субстратного состава с фиксированным спектром. Измерения: состав сообщества (16S рРНК-секвенирование на каждом шаге отбора) и биогеохимический выход (CO_2 , CH_4 , O_2 , редокс-потенциал). Метрики: (а) эхо-состояние — сходимость траекторий состава после снятия возмущения для пар реплик с различными начальными условиями; (б) разделение — точность линейного зонда, дискриминирующего историю входа по составу; (с) ёмкость памяти МС реконструкцией задержанного входа по газовому выходу. Контроль: консорциумы того же состава без рекуррентных трофических связей (линейная цепь). Критерий успеха: $\text{MC} \geq 1$ и ESP у рекуррентного консорциума при их отсутствии у контроля. Сроки: 2–3 года. Реалистичность: высокая (стандартная микромикроскоп-инфраструктура).

8.2. Наблюдательные исследования

8.2.1. Астросейсмология (H4, H4.1)

Поиск приливных резонансов g-мод. Использование данных космических телескопов TESS и PLATO для поиска звёзд с близкими планетами-гигантами, а также данных миссии Juno по мультипольным моментам Юпитера [122] для калибровки моделей мультиквадрупольного управления. Анализ спектров колебаний на наличие спектральных компонент на орбитальных частотах и их гармониках. Метрика успеха: статистически значимое превышение фазовых корреляций над уровнем случайности в выборке не менее 1000 систем. Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: высокая.

Комбинационные частоты. Поиск нелинейных взаимодействий между модами звезды как индикатора сильной внутренней связи. Сроки: 2–4 года. Реалистичность: высокая.

8.2.2. Магнитное взаимодействие звезда–планета (H4, H4.1)

Фазово-разрешённая спектроскопия. Использование существующих спектрополяриметров (например, ESPaDOnS на Canada-France-Hawaii Telescope, NARVAL на Telescope Bernard Lyot, PEPsi на Large Binocular Telescope) для поиска орбитально-фазированных хромосферных горячих пятен на звёздах с близкими планетами-гигантами [77, 78]. Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: высокая.

8.2.3. Нейтронные звёзды и глитчи (Н2.2, Н2.5, Н3.2)

Статистика глитчей. Анализ существующих каталогов глитчей пульсаров на предмет: (а) степенных законов распределения размеров и времён ожидания; (б) зависимости скорости восстановления после глитча от предполагаемой внутренней температуры пульсара; (в) корреляции с нейтринными событиями для ранних нейтронных звёзд, если таковые наблюдались (Н3.4). Анализ данных пульсарного тайминга для поиска вариаций квадрупольных моментов в двойных системах с пульсарами [123]. Метрика успеха: наличие зависимости времени восстановления от температуры, что подтверждает гипотезу о термическом синапсе (Н3.2). Сроки: 1–2 года. Реалистичность: высокая.

Мониторинг теплового рентгеновского излучения. Долговременный мониторинг теплового рентгеновского излучения пульсаров, проявляющих глитчи. Сроки: 5–10 лет. Реалистичность: средняя.

8.2.4. Палеомагнетизм и биосферные события (Н4.7, Н4.8)

Статистика инверсий. Анализ баз данных палеомагнитных инверсий на предмет корреляций с крупными биосферными событиями. Обязательный контроль на внешние факторы: ударные события, трапповый вулканизм. Сроки: 2–4 года. Реалистичность: средняя.

8.2.5. Нейтринные исследования (Н4.2, Н4.4, Н3.2)

Асимметрия день–ночь. Использование данных действующей обсерватории Супер-Камиоканде [93], а в перспективе — обсерватории Гипер-Камиоканде (ввод в строй ожидается не ранее 2027–2030 гг.), для измерения асимметрии в регистрации солнечных нейтрино днём и ночью (эффект МСВ при прохождении через Землю). Метрика успеха: независимое подтверждение оценок сечения нейтрино-ядерного взаимодействия и верификация расчётов энергобаланса из раздела 4.2, а также подтверждение отсутствия измеримого структурного отклика вещества на нейтринный поток при $\tau_\nu \ll 1$. Сроки: 5–10 лет. Реалистичность: высокая.

Геонейтринные временные ряды. Анализ данных действующих детекторов геонейтрино (КамЛАНД, Борексино) и строящегося детектора JUNO. Сроки: 5–8 лет. Реалистичность: средняя.

Сети готовности к сверхновым. Координация нейтринных детекторов для регистрации нейтринного всплеска от следующей галактической сверхновой с целью изучения коллективных нейтринных осцилляций [88]. Сроки: неопределённые. Реалистичность: высокая в части готовности инфраструктуры.

Примечание о нейтринном канале. Нейтринный канал обратной связи (планета $\rightarrow$ звезда через геонейтрино) был строго отвергнут в разделе 4.2.1 на основе оценки сечений взаимодействия и энергобаланса. Настоящие измерения асимметрии день–ночь для солнечных нейтрино служат для верификации сечений нейтрино-ядерного взаимодействия, использованных в этом отвержении. Если будущие эксперименты покажут, что сечения взаимодействия или механизмы передачи энергии существенно отличаются от предсказаний Стандартной модели, вывод об отвержении нейтринного канала может быть пересмотрен.

8.2.6. Внутренняя динамика компактных объектов (НЗ.2, НЗ.4)

Анализ данных пульсарных обзоров (глитчи, тайминг, изменения магнитного поля) и функции светимости белых карликов (Gaia) для проверки гипотезы о самообучении компактных объектов со сверхэкстремальными условиями. Метрики успеха: (а) обнаружение корреляций между различными проявлениями внутренней динамики нейтронных звёзд (глитчи, изменения магнитного поля, осцилляции), свидетельствующих о внутренней обратной связи; (б) обнаружение задержки в функции светимости белых карликов при кристаллизации, свидетельствующей о внутренней структурной памяти. Сроки: 2–4 года. Реалистичность: высокая.

Популяционный анализ охлаждения. Анализ данных миссии Gaia по белым карликам [46]. Сроки: 1–3 года. Реалистичность: высокая.

8.2.7. Популяционный анализ экзопланет (Н1.1)

Поиск следов резонансного захватывания. Анализ каталогов экзопланет (в частности, данных миссий TESS и, в перспективе, PLATO) на предмет аномалий в распределении орбитальных периодов планет земной группы в зоне обитаемости. Метрика успеха: обнаружение статистически значимых скоплений (pile-ups) орбитальных периодов, которые коррелируют с частотами внутренних g-мод материнских звёзд (определяемых методами астросейсмологии). Это стало бы прямым наблюдательным подтверждением механизма, описанного в разделе 4.5. Для калибровки моделей приливной деформации используются измеренные числа Лява для экзопланет WASP-12b ($h_2 = 1.55 \pm 0.45$) [124] и WASP-103b ($h_f = 1.59^{+0.45}_{-0.53}$) [125]. Методология извлечения чисел Лява из транзитных данных описана в [126]. Обязательный учёт наблюдательных смещений; дополнительная стратификация выборки по выведенному усилению γ_{eff} (раздел 6.11.7) и по порядку спин-орбитальной комменсурабельности $P_{\text{rot}}/P_{\text{orb}}$: гипотеза предсказывает концентрацию pile-ups в подмножестве систем с $\gamma_{\text{eff}} \in [\gamma_{\text{hold}}, \gamma_{\text{over}}]$ и

низкопорядковыми комменсурабельностями (раздел 4.5.3, механизм 13). Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: средняя (требует больших выборок с точной астросейсмологией звёзд).

Сравнительный анализ. Сравнение системы Солнце–Земля–Луна с экзопланетными системами аналогичного возраста и металличности. Сроки: 2–4 года. Реалистичность: высокая.

8.2.8. Прямое биодетектирование на экзопланетах (Н1.1) — долгосрочная перспектива

Проверка гипотезы Н1.1 о направленной стабилизации требует прямого детектирования биосигнатур в атмосферах экзопланет земной группы в зоне обитаемости. Современные методы (трансмиссионная спектроскопия, прямая визуализация) позволяют анализировать атмосферы газовых гигантов и суперземель, но недостаточно чувствительны для планет земной группы. Выполнение этой задачи станет возможным с вводом в строй телескопов следующего поколения (Habitable Worlds Observatory, Extremely Large Telescope) и развитием методов коронографии. Ожидаемые сроки: 2040-е годы и далее.

8.2.9. Реконструкция эволюции приливного отклика Земли (тестирование фазы 2 на палеоданных)

Численное моделирование эволюции числа Лява k_2 и приливной диссипации Земли на масштабах 4,5 млрд лет с учётом формирования Луны, остывания мантии и, критически важно, конденсации первых океанов. Метрика успеха: выявление того, совпадает ли момент формирования глобальной гидросферы (и, предположительно, пребиотической химии) с качественным изменением режима приливной эволюции системы Земля–Луна и переходом в режим, способствующий стабилизации орбитальных и ротационных параметров. Сроки: 2–3 года. Реалистичность: высокая.

8.2.10. Квантово-гравитационные эффекты в физике нейтрино — долгосрочная перспектива

В разделе 8 отмечено, что текущий вывод о неприменимости нейтрино для обратной связи основан на лучшем доступном понимании физики. Если в будущем будут открыты квантово-гравитационные эффекты, нестандартные взаимодействия или коллективные нейтринные осцилляции в экстремальных условиях, которые радикально изменят сечения взаимодействия нейтрино с веществом, вывод может быть пересмотрен. Это требует развития теории

квантовой гравитации и экспериментов за пределами Стандартной модели. Ожидаемые сроки: неопределённые. Реалистичность: низкая.

8.2.11. Методологическая подготовка: компонентный анализ ΔJ_2 Земли на данных миссий GRACE и GRACE-FO

Использование открытых данных миссий GRACE (2002–2017) и GRACE-FO (2018–настоящее время) для отработки методологии компонентного анализа временных вариаций квадрупольного момента Земли. Цель — выделить вклады различных процессов (таяние ледников, постледниковый подъём, изменение уровня океанов, биосферные процессы) в наблюдаемый сигнал ΔJ_2 . Метрика успеха: создание методологии разделения сигнала ΔJ_2 на компоненты и оценка вклада биосферных процессов. Методологическая оговорка: данная задача направлена исключительно на создание и отладку инструментария компонентного анализа для будущих исследований; она не служит прямой проверкой гипотезы НЗ.3, поскольку временной ряд данных миссий GRACE/GRACE-FO (~23 года) принципиально недостаточен для выявления трендов направленной стабилизации, работающих на масштабах миллионов лет. Сроки: 1–2 года. Реалистичность: высокая.

8.2.12. Топологический анализ звёздных конвективных паттернов (Н2.1)

Использование данных астросейсмологии (миссии TESS, PLATO, Kepler) и численного моделирования звёздной конвекции для проверки гипотезы о самоорганизации конвективных ячеек, магнитных полей и осцилляционных мод в сетевые структуры с дискретными состояниями и пороговой динамикой. Метрика успеха: обнаружение топологических признаков сетевой структуры (степенной закон распределения степеней, коэффициент кластеризации, малый средний путь) в численных моделях и наблюдательных данных. Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: высокая.

8.2.13. Топологический анализ планетарных недр (Н2.3)

Использование данных сейсмической томографии (для Земли), гравитационных измерений (миссия Juno для Юпитера, Cassini для Сатурна) и численного моделирования мантийной конвекции для проверки гипотезы о самоорганизации геодинамо, мантийной конвекции и фазовых переходов в сетевые структуры. Метрика успеха: обнаружение топологических признаков сетевой структуры в моделях планетарных недр. Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: средняя.

8.2.14. Резервуарная функциональность звёздных осцилляций (Н2.4)

Анализ данных астросейсмологии на предмет наличия свойств резервуара в осцилляционных модах звёзд: эхо-состояние (зависимость текущего состояния мод от истории возмущений), разделение (различные возмущения порождают различные спектры мод), затухающая память (влияние старых возмущений затухает). Метрика успеха: количественное подтверждение трёх свойств резервуара для осцилляционных мод звёзд. Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: средняя.

8.2.15. Резервуарная функциональность планетарных недр (Н2.6)

Анализ данных палеомагнетизма и сейсмологии на предмет наличия свойств резервуара в геодинамо и мантийной конвекции планет: эхо-состояние (магнитное поле хранит память о предыдущих состояниях), разделение (различные возмущения порождают различные конфигурации поля), затухающая память (влияние старых возмущений затухает). Метрика успеха: количественное подтверждение трёх свойств резервуара для геодинамо. Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: средняя.

8.2.16. Влияние компактных объектов на планеты-компаньоны (Н4.3)

Анализ данных пульсарных обзоров для поиска влияния компактных объектов (нейтронных звёзд, белых карликов) на планеты-компаньоны через гравитационные, магнитные каналы и радиацию. Метрика успеха: обнаружение корреляций между параметрами компактного объекта (глитчи, магнитное поле) и параметрами планет-компаньонов. Сроки: 2–4 года. Реалистичность: средняя.

8.2.17. Влияние звёздной активности на биосферу (Н4.5)

Анализ палеоданных Земли на предмет корреляций между звёздной активностью Солнца (УФ-излучение, космические лучи, звёздный ветер) и крупными биосферными событиями (массовые вымирания, радиации, изменения биоразнообразия). Обязательный контроль на внешние факторы: ударные события, вулканизм. Метрика успеха: обнаружение статистически значимых корреляций между звёздными циклами и биосферными событиями. Сроки: 2–4 года. Реалистичность: средняя.

8.2.18. Влияние биосферы на звезду через планету (Н4.6) — долгосрочная перспектива

Анализ палеоданных Земли на предмет корреляций между крупными биосферными событиями (Великое кислородное событие, кембрийский взрыв) и изменениями в солнечной активности или приливном взаимодействии. Метрика успеха: обнаружение статистически значимых корреляций между биосферными событиями и параметрами Солнца.

Критическая оговорка: данная задача является крайне спекулятивной, поскольку влияние биосферы на звезду опосредовано планетой и может быть настолько слабым, что наблюдательная проверка палеоданными Земли принципиально не даст статистически значимого результата на доступных временных рядах. Задача включена как долгосрочная перспектива, требующая либо принципиально новых методов детектирования слабых сигналов, либо перехода к экзопланетным системам с сильным биосферным сигналом. Отрицательный результат по этой задаче является полноценным научным результатом, устанавливающим верхнюю границу силы биосферно-звёздной связи. Сроки: 5–10 лет. Реалистичность: низкая для Земли, средняя для будущих экзопланетных исследований.

8.3. Теоретические исследования

8.3.1. Предварительный анализ минимального сигнала качества R

Формальный анализ вопроса: каков простейший физический сигнал качества, способный превратить релаксацию в обучение в смысле уравнения (2)? Рассмотрение кандидатов: градиент диссипации, градиент стабильности, градиент предсказуемости. Сроки предварительного этапа: 2–3 года. Реалистичность: высокая для предварительного этапа; полный результат не ограничен временными рамками программы.

8.3.2. Обобщённые правила пластичности

Расширение анализа за пределы правила Хебба. Сроки: 2–4 года. Реалистичность: высокая.

8.3.3. Бюджеты предиктивной информации

Для каждого субстрата-кандидата из Таблицы 1 — количественная оценка предиктивной информации [21]. Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: средняя.

8.3.4. Теоретические модели самообучения компактных объектов (НЗ.2, НЗ.4)

Построение моделей внутренней обратной связи в нейтронных звёздах и белых карликах: (а) нейтринный канал — моделирование взаимодействия нейтрино с ядерной пастой в ранних нейтронных звёздах с оценкой вероятности каскадных эффектов; (б) вихрево-флюксоидный канал — моделирование взаимодействия вихрей и флюксоидов как сети с пластичностью; (в) сейсмический канал — моделирование глобальных осцилляций как механизма переноса информации между слоями. Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: средняя.

8.3.5. Проблема считывателя

Формальный анализ: при каких условиях связанная подсистема является считывателем в смысле теории резервуарных вычислений [22–27]? Сроки: 1–3 года. Реалистичность: высокая.

8.3.6. Масштабирование редуцированной модели на 3D сферическую МГД и задачу N тел

В настоящей работе (подраздел 6.11) представлена практическая демонстрация концепции на редуцированной модели (сеть связанных осцилляторов Лоренца). Эта модель подтверждает принципиальную способность конвективного резервуара обеспечивать фазовое подсинхронизирование и резонансное удержание орбиты. Однако для количественного переноса полученных результатов на реальные астрофизические системы необходимо решение следующих задач масштабирования:

(а) Переход к сферической геометрии. Замена декартовой сети осцилляторов на усечённые уравнения анэластической МГД в сферических гармониках. Связи между модами определяются коэффициентами Клебша–Гордана, а не случайной матрицей. Инструментарий: коды ASH (Anelastic Spherical Harmonic) или Rayleigh.

(б) Интеграция с задачей N тел. Замыкание петли обратной связи в реальном времени: эволюция орбит каждой из N планет (интегратор WHFast/REBOUND) на каждом шаге пересчитывает приливной потенциал $V_{\text{tidal}}(r, \theta, \phi, t)$, подаваемый на вход МГД-резервуара. Мультиквадропольный момент $J_n(t)$, генерируемый резервуаром, воздействует обратно на орбиты.

(в) Замена внешнего обучения на физическое. В редуцированной модели веса считывателя W_{out} обучаются методом ridge regression (внешний алгоритм). В полной модели обучение осуществляется через физическое иерархическое правило модификации $dw_i/dt = G_{\text{local}}(x_i, w) + R_{\text{bio}}(t) \cdot G_{\text{global}}(x_i, w, u_{\text{tide}})$. Необходимо продемонстрировать, что физическое правило

модификации (МГД-динамика) обеспечивает направленную стабилизацию орбиты, качественно аналогичную результатам, получаемым с внешним алгоритмом обучения, выступая в роли естественного самонастраивающегося регулятора.

(г) Калибровка числа мод. Оценка минимального количества сферических гармоник N_{mod} , необходимого для сходимости результата. Проверка того, что редуцированная модель ($N = 100\text{--}1000$) не теряет критических нелинейных взаимодействий при масштабировании.

(д) Стохастический шум и многопланетная динамика. Добавление гравитационных возмущений от дополнительных планет (аналог Юпитера) для проверки устойчивости резонансного захвата в реалистичных условиях. Количественная проверка условия устойчивости $|\delta n_{\text{шум}}| < \Delta\omega_{\text{резонанс}} = n_j \cdot \sqrt{(\Delta J_2 \cdot (R/r_j)^2)}$.

(е) Двухфазная процедура. Реализация фазы А (предобучение, $R_{\text{bio}} = 0$) и фазы Б (тонкая настройка, $R_{\text{bio}} > 0$) в полной 3D МГД-симуляции. Критерий завершения фазы А: $|dw_i/dt| < \delta_w$ для всех i .

Метрика успеха: демонстрация направленной стабилизации орбиты каменной планеты в зоне обитаемости на временах $\sim 10^8$ лет в рамках полно-3D анэластической МГД-симуляции, связанной с интегратором N тел, без внешнего алгоритма обучения. Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: высокая (требует кластерных вычислений, но опирается на существующие открытые коды ASH, Rayleigh, REBOUND). Вычислительные ресурсы: кластер с GPU NVIDIA A100/H100 (для 3D МГД) + CPU-кластер (для задачи N тел). Ориентировочное время одного прогона: $10^4\text{--}10^5$ CPU-часов.

Примечание о климатическом модуле. Нульмерный климатический модуль настоящей работы калиброван (линеаризованный закон Клаузиуса–Клапейрона с единичным усилением, расписание форсинга в координатах возраста) и воспроизводит первопорядковые черты палеоклимата (раздел 6.11.9); тем не менее для полной 3D-постановки задачи 8.3.6 модуль климата должен быть заменён на упрощённую, но пространственно разрешённую модель общей циркуляции (например, PlaSim или cGENIE), что позволит корректно воспроизвести эффект «тусклого молодого Солнца» и проверить, способен ли механизм Триединой структуры обеспечить направленную стабилизацию температуры в глобальном масштабе без искусственной подгонки параметров выветривания.

8.3.7. Количественное моделирование приливного резонансного захватывания для каменных планет (Н1.1)

Модификация существующих кодов приливной эволюции (например, Eqtide или N-body симуляторов с приливными силами) для включения частотно-зависимых чисел Лява $k_2(\omega)$ и приливной добротности $Q(\omega)$.

Ключевое дополнение (Биогенная ступень гидратации): В код должна быть добавлена функция ступенчатого изменения реологии мантии, привязанная к термическому триггеру конденсации глобального океана ($T_{\text{surf}} < 373 \text{ K}$). В момент формирования гидросферы активируется канал субдукции воды, что моделируется как скачкообразное снижение эффективной вязкости мантийного клина на 1–2 порядка (за счет префактора фугитивности $f_{\text{H}_2\text{O}}^{1.2}$ по Hirth & Kohlstedt, 2003). Это, в свою очередь, вызывает резкий рост мнимой части числа Лява $\text{Im}(k_2)$ и снижение эффективной добротности $Q(\omega)$ в 3–10 раз при практической неизменности вещественной части $\text{Re}(k_2)$.

Метрика успеха (ρ_{k_2q}): Введение метрики относительной биогенной модуляции $\rho_{k_2q} = |k_2/Q_{\text{ON}} - k_2/Q_{\text{OFF}}| / k_2/Q_{\text{OFF}}$. Задача считается решенной, если симуляция демонстрирует, что скачок k_2/Q в момент появления океана достаточен для «запираания» планеты в резонансе с g-модами звезды (resonance locking) на фоне стохастических возмущений от других планет системы, при условии, что ρ_{k_2q} превышает порог 0.10, а интегральное отношение сигнал/шум (SNR) за окно 500 млн лет превышает 3.0 (согласно бюджету задачи 8.3.13). Сроки: 2–3 года. Реалистичность: высокая.

8.3.8. Количественная оценка мультиквадрупольного управления звёздной динамикой

Численное моделирование внутренней динамики звезды с целью оценки того, может ли внутреннее перераспределение массы создать переменные мультипольные моменты (J_2, J_3, J_4), достаточные для резонансного воздействия на несколько планет одновременно. Метрика успеха: оценка величины мультипольных моментов и сравнение с порогом, необходимым для резонансного захватывания нескольких планет. Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: средняя.

8.3.9. Проверка начальных весов через численное моделирование (Н1.1, Н3.3)

Построение упрощённой модели нейронной сети для системы Солнце–Земля с начальными весами, определёнными наблюдаемым распределением массы. Подача входного сигнала от Земли к Солнцу (приливной потенциал, модулированный числами Лява) и проверка

способности отклика Солнца (изменение мультиквадрупольного момента) стабилизировать орбиту Земли. Метрика успеха: 1. Наличие отклика Солнца на приливной потенциал (изменение мультиполей). 2. Направленность отклика на Землю (резонансная селективность). 3. Способность стабилизировать орбиту за реалистичное время ($\sim 10^8$ – 10^9 лет). Интерпретация: если начальные веса способны стабилизировать систему — система «предобучена» эволюцией; если не способны — требуется обучение через сигнал качества R. Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: средняя (требует значительных вычислительных ресурсов).

8.3.10. Самообучение звёзд: двухмасштабная динамика осцилляционных мод и магнитной топологии (Н3.1)

Численное моделирование взаимодействия конвективных ячеек, магнитных полей и осцилляционных мод звёзд с целью проверки гипотезы о двухмасштабной динамике: быстрые переменные (осцилляционные моды) и медленные переменные (магнитная топология, паттерны конвекции). Метрика успеха: обнаружение правила модификации медленных переменных под воздействием быстрых. Сроки: 3–5 лет. Реалистичность: средняя.

8.3.11. Абляционная проверка коллективности (Н1.2) на модели Tier-2

Полный факториальный прогон гиперграфа $6N+14$ (Приложение 2) с отключением собственных подмножеств каналов (биосферные метаканалы; океанский резонанс k_2/Q ; спутниковые каналы; квадрупольный канал при сохранении триггерного). Метрика: баланс $\Sigma|\text{прямые}| \approx \Sigma|\text{обратные}| \rightarrow \lambda \approx 0$ и порог захвата k_{crit} . Критерий успеха Н1.2: ни одно собственное подмножество не воспроизводит метрики полной сети. Стоимость: 67–135 прогонов при $N = 100$ на GPU (Таблица 9.2 Приложения 2) ≈ 1 –2 часа.

8.3.12. Численный дискриминатор обучения и релаксации (Т1–Т3 подраздела 6.11.13).

Реализация трёх предрегистрированных тестов на Tier-1 (лоренцевский резервуар) и Tier-2 (гиперграф $6N+14$): зависимость считывателя от предобучения; контрастивное обновление медленных переменных на контрфактических ветвях; ансамблевый отбор по выживанию биосферы. Метрики: Ду против шумового пола; сходимость D при контрастивном правиле; KL-дивергенция распределения выживших. Стоимость: ~ 200 прогонов Tier-1 (минуты) и 100–200 прогонов Tier-2 (1–2 ч GPU). Фальсификаторы: см. 6.11.13.

8.3.13. Бюджет сигнал/шум биогенного приливного канала (weathering $\rightarrow$ k_2/Q)

Для проверки гипотезы о достаточной амплитуде биогенной модуляции медленных переменных (Н4.8) проводится оценка порядка величины для канала «биогенное выветривание $\rightarrow$ субдукция воды $\rightarrow$ вязкость мантии $\rightarrow$ приливная добротность k_2/Q ».

1. Биогенная доля выветривания. Согласно консервативным оценкам (Berner, 1992; Moulton & Berner, 1998 [139]), биота усиливает химическое выветривание силикатов в $\beta \approx 2\text{--}4$ раза. Принимая $\beta = 3$, биогенная доля современного потока выветривания составляет $(\beta - 1)/\beta \approx 0.67$. Экспериментальные оценки на речных водах Исландии дают 2–10, теоретические пределы Шварцмана–Волка — до 100.

2. Механизм водного ослабления мантии (фугитивность). Ключевой эффект субдукционной воды на реологию мантии связан не с изменением энергии активации (разница $Q_{\text{dry}} - Q_{\text{wet}}$ для дислокационного скольжения оливина составляет лишь ~ 10 кДж/моль), а с префактором фугитивности воды $f_{\text{H}_2\text{O}}^r$ (где $r \approx 1.2$) в законе ползучести (Hirth & Kohlstedt, 2003 [140]). При увеличении концентрации гидроксильных групп с 1 до ~ 1000 мас. ppm (H/Si) скорость ползучести возрастает на 3–4 порядка, что эквивалентно локальному снижению вязкости в $10^3\text{--}10^4$ раз в зонах гидратации.

3. Объемное взвешивание. Гидратированный мантийный клин и астеносфера составляют $\sim 5\text{--}10\%$ объема мантии, но вносят доминирующий вклад в глобальную приливную диссипацию в анеластической полосе. Локальное снижение вязкости на 3 порядка в $\sim 10\%$ этого объема (зоны субдукции) дает эффективную глобальную модуляцию вязкости мантии на $\sim 10\text{--}30\%$. Поскольку в вязкостном и переходном режимах диссипация обратно пропорциональна эффективной вязкости, биогенная модуляция k_2/Q составляет $\sim 0.67 \times 0.20 \approx 0.13$ (то есть $\sim 13\%$).

4. Оценка шума и SNR. Главным источником абиотического шума являются трапповые извержения (LIP), выбрасывающие базальты, которые выветриваются в 5–10 раз быстрее гранитов. Крупное LIP-событие вызывает глобальный пик выветривания амплитудой $\sim 50\%$ (или ~ 0.75 в единицах биогенной модуляции) длительностью $\tau_{\text{LIP}} \sim 1\text{--}5$ млн лет. При средней частоте LIP ~ 1 событие на 50 млн лет (рабочий цикл $D \sim 10\%$) дисперсия такого импульсного процесса составляет $\sigma^2 \approx A^2 \times D(1 - D) \approx 0.75^2 \times 0.1 \times 0.9 \approx 0.05$, откуда $\sigma_{\text{noise}} \approx 0.22$. С учетом прочего тектонического шума принимаем консервативное $\sigma_{\text{noise}} = 0.3$.

5. Интегрирование сигнала (Девонский скачок). Биогенное усиление — не мгновенная ступень, а нарастающая функция с крупнейшим скачком в девоне (~400 млн лет назад, появление сосудистых растений). Для строгой оценки снизу сигнал интегрируется только за последние $\tau_{\text{int}} = 5 \times 10^8$ лет (после девонского скачка), где $\beta \approx 3$ стабильно. При времени корреляции шума $\tau_{\text{corr}} \approx 10^6$ лет (длительность LIP-событий) отношение сигнал/шум составляет: $\text{SNR} = (0.13 / 0.30) \times \sqrt{(5 \times 10^8 / 10^6)} \approx 0.43 \times 22.3 \approx 9.6$

Вывод. Даже при самых консервативных допущениях (интегрирование только после девона, учет фугитивности вместо энергии активации, импульсный шум LIP) отношение сигнал/шум составляет $\text{SNR} \approx 9.6 \gg 3$. Это доказывает, что биогенный сигнал не теряется в геологическом шуме. Предрегистрированный фальсификатор для численных тестов: если в моделях с полной физикой (Tier-2) амплитуда модуляции $\rho_{k2q} < 0.03$ при живой биосфере, канал считается погребенным под шумом, и гипотеза H4.8 в ее сильной форме отвергается.

8.4. Инфраструктура

8.4.1. Открытый глоссарий

Создание и поддержка открытого глоссария, отображающего терминологию между физикой конденсированного состояния, резервуарными вычислениями, нейтринной физикой и наукой о системе Земли. Сроки запуска: 1 год. Реалистичность: высокая.

8.4.2. Репозиторий данных

Создание единого репозитория данных для каталогов глитчей пульсаров, записей палеомагнитных инверсий, астросейсмических спектров и данных экзопланетных обзоров в унифицированном формате. Сроки запуска: 2 года. Реалистичность: высокая.

8.4.3. Предрегистрированные правила решений

Для каждой гипотезы H0–H4: депонирование правил решений в открытом репозитории до начала сбора данных. Сроки: до начала каждого конкретного исследования. Реалистичность: высокая.

8.4.4. Серия рабочих совещаний

Организация ежегодных рабочих совещаний, ротируемых между тремя родительскими сообществами. Сроки: ежегодно. Реалистичность: высокая.

8.5. Историческая калибровка и объективная оценка перспектив

Исторический опыт междисциплинарных программ показывает, что институционализация таких областей (например, квантовой биологии от Шрёдингера [2] до современных экспериментальных подтверждений) занимает несколько десятилетий. Не предсказывая конкретный срок для настоящей программы, можно указать, что полная реализация может потребовать нескольких десятилетий и смены поколения исследователей.

Программа включает как задачи, направленные на прямую проверку гипотез (например, 8.2.7, 8.3.7), так и методологические задачи (например, 8.2.11), направленные на создание инструментария для будущих исследований. Это отражает реалистичную оценку того, что полная проверка программы потребует десятилетий работы.

Следует сознательно подчеркнуть: значительная часть задач программы относится к категории поисковых, и отрицательный результат по любой из гипотез является полноценным научным результатом. Программа сформулирована таким образом, чтобы быть продуктивной при любом исходе — как при подтверждении, так и при отвержении выдвинутых гипотез.

9. Эпистемические оговорки

Апофения. Центральным риском любой программы, ищущей структуру в сложных природных системах, — обнаружение закономерностей там, где их нет. Процедурные контрмеры обязательны: равновесные референсные состояния; рандомизированные графы с сохранённым распределением степеней; временное перемешивание; линейные суррогаты. Все тесты должны быть слепыми к гипотезам, с критериями, зафиксированными до раскрытия данных (раздел 8.4.3). В частности, при применении методов теории графов к результатам молекулярной динамики обязателен контроль с рандомизированными графами с сохранёнными распределениями степеней, чтобы избежать ложного обнаружения сетевой структуры там, где она является артефактом метода.

Разграничение морфометрических совпадений и функциональных утверждений. Следует чётко отличать морфометрические совпадения от функциональных утверждений. Количественное сходство между нейронной сетью и космической паутиной [127] или универсальные свойства сетевой космологии [128] представляют собой интересные морфометрические наблюдения, но сами по себе не устанавливают наличия вычислений или обучения. То же относится к любым структурным аналогиям между недрами планет/звёзд и биологическими

нейронными сетями: изоморфизм топологии не эквивалентен изоморфизму функции. Только удовлетворение операционным критериям разделов 2.1–2.3 (особенно наличию нетривиального сигнала качества R) превращает морфометрическое совпадение в научное утверждение о функциональности.

Иерархия эмерджентных свойств. В сложной иерархической системе, такой как «звезда–планета–биосфера», разные уровни могут демонстрировать разные эмерджентные свойства, которые в антропоморфной интерпретации могут быть описаны как разные «целевые функции». Глобальная система может демонстрировать направленную стабилизацию условий в зоне обитаемости (раздел 4.5), в то время как внутренние подсистемы (ядерная паста в нейтронной звезде, геодинамо в планете) могут «стремиться» к минимизации локальной диссипации или максимизации стабильности собственных конфигураций. Эти эмерджентные свойства могут конфликтовать, создавая компромиссы и напряжения. Настоящая работа описывает иерархический конфликт между локальной термодинамической релаксацией и глобальной биосферной стабилизацией математически в разделе 6.9 (пункты 6.9.3 и 6.9.13) через конкурирующие компоненты правила модификации весов (G_{local} и G_{global}). Количественная калибровка этих компонент и анализ их баланса для конкретных систем являются предметом задачи 8.3.6.

Пределы текущего понимания. Настоящая работа отвергает нейтринную гипотезу обратной связи на основе текущего понимания физики нейтрино и их взаимодействий с веществом. Но нельзя не признать, что наука постоянно развивается, и будущие открытия (коллективные нейтринные осцилляции в экстремальных условиях, нестандартные взаимодействия, квантово-гравитационные эффекты) теоретически могли бы изменить эту оценку. На данный момент нет ни наблюдательных, ни теоретических указаний на существование таких механизмов. Следовательно, сделанный вывод обоснован на лучших доступных данных, но, как и любой научный вывод, остаётся открытым для пересмотра.

Пределы гипотезы: случайные события и предварительные условия. Настоящая работа выдвигает гипотезу о механизме направленной стабилизации системы «звезда–планета–биосфера» после того, как система уже оказалась в благоприятной конфигурации. Статья не претендует на объяснение того, как система пришла в эту конфигурацию. Формирование Луны в результате гигантского столкновения с Тейей ~4,5 млрд лет назад является примером случайного катастрофического события, произошедшего до появления жизни и не объяснимого через обратные связи системы. Луна создала благоприятные условия для последующей

направленной стабилизации (стабилизация оси, приливы, замедление вращения), но сама не была её результатом. Предположение о том, что звезда могла влиять на динамику планетезималей в протопланетном диске через модуляцию звёздного ветра или магнитного поля, увеличивая вероятность «благоприятных» столкновений, является крайне спекулятивным и не имеет наблюдательных или теоретических оснований. Предлагаемая гипотеза описывает механизм поддержания благоприятных условий, а не механизм их создания. Двойные звёздные системы, в которых был первоначально изучен механизм переменного квадрупольного момента [114, 115], не являются целью настоящего исследования; они служат физической основой для механизма, адаптированного к системе звезда–планета–биосфера.

Модель предсказывает, что вековая орбитальная миграция через канал Апплгейта пренебрежимо мала, что согласуется с отсутствием наблюдаемых "орбитальных ловушек" в экзопланетных системах. Стабилизация реализуется через климатические метаканалы, а не через прямое изменение орбиты.

Возможность каскадных эффектов от нейтринных взаимодействий. Отвержение нейтринного канала основано на оценке полной депонируемой энергии ($\sim 10^4$ Вт для Земли), на 9 порядков ниже геотермального потока, при дефиците сечения на 12–13 порядков. Однако эта оценка предполагает аддитивность независимых взаимодействий. Не исключено, что в сверхэкстремальных условиях (ядерная паста нейтронных звёзд, фазовые переходы) редкие взаимодействия нейтрино могут вызывать каскадные реакции (лавины, фазовые переходы), усиливающие эффект на порядки. Это особенно вероятно для нейтронных звёзд, где плотность нейтрино колоссальна, а вещество находится вблизи фазовых переходов. Если такой механизм существует, он может играть роль во внутренней динамике компактных объектов (механизм глитчей), но вряд ли создаёт обратную связь между звездой и планетой из-за отсутствия модуляции нейтринного потока планетой. Проверка требует численного моделирования взаимодействия нейтрино с ядерной пастой (задача 8.3.4).

Происхождение механизма переменного квадрупольного момента. Механизм переменного квадрупольного момента звезды был первоначально предложен и изучен для двойных звёздных систем [114–117]. В настоящей работе проводится его адаптация к системе звезда–планета, исходя из предположения, что физика перераспределения массы внутри звезды одинакова в обоих случаях. Это предположение требует количественной проверки (задача 8.3.8).

Метафора и механизм. Все утверждения настоящей программы находятся на уровнях 3–4 Вставки 1. Утверждения уровней 1–2 явно исключены из набора гипотез.

Проблема телеологии и её разрешение. Настоящая работа избегает телеологических объяснений в пользу каузальных. Формулировки типа «звезда решает стабилизировать орбиту» являются метафорическими и не должны пониматься буквально. Физический механизм не требует целеполагания: он является следствием селективного удержания — аналога естественного отбора на уровне планетных систем. Конфигурации, случайно обеспечивающие стабильность биосферы, сохраняются на геологических временах; конфигурации, ведущие к дестабилизации, элиминируются. Это объясняет наблюдаемую стабилизацию без привлечения телеологии.

Коммуникационный риск. Терминологическое загрязнение является реальной опасностью: «обучение», «память», «пластичность» и «сеть» несут специфические значения в нейробиологии и информатике, отличающиеся от их употребления в физике конденсированного состояния и геофизике. Терминологическая дисциплина — операционное определение каждого термина при первом употреблении и сохранение определения на протяжении всего текста — является частью метода. Именно поэтому используется понятие «самонастраивающегося регулятора» (раздел 1) для избежания антропоморфных коннотаций.

Оговорка скромности. Если все двадцать семь гипотез выживают лишь в слабой форме, результатом программы является строгая характеристика того, почему вещество недр не является мозгом, — что само по себе нетривиальный научный результат и предпосылка для будущего прогресса.

10. Заключение

Исторические запреты на сетевые структуры в недрах основывались на неправомерно перенесённом молекулярном аргументе; они заменены масштабозависимым критерием (3)–(4). Среда недр реализует существенную часть сетевых и резервуарных критериев; аналоги экстремальных субстратов нейтронных звёзд (ядерная паста [63–65], вихревые сети [43]) обнаруживаются в недрах планет. Система «звезда–планета–биосфера» гипотетически объединяется в единую самообучающуюся структуру, функционирующую на уровне самонастраивающегося регулятора. Нейтринный канал, строго проанализированный в настоящей работе, является «немым»: чтение формально открыто, но запись закрыта в нормальных условиях из-за ничтожного сечения взаимодействия; эта гипотеза обратной связи отвергнута. Остаётся открытым

вопрос, существует ли естественный механизм обратной связи в системе «звезда–планета–биосфера». Рассмотренные кандидаты — от приливных резонансов с g-модами звезды [73–76] до магнитных «крыльев Альфвена» [77–79], сейсмических мод планет, дислокационных сетей ядер и биогеохимических циклов [101] — представляют собой гипотетические механизмы, требующие количественной проверки. Их ранжирование по способности модулировать внутреннюю структуру небесных тел и биосферы не является утверждением об их существовании, а лишь указанием приоритетов для будущих исследований.

Особого внимания заслуживает гипотеза о возможной направленной стабилизации системы «звезда–планета–биосфера» (раздел 4.5). Перевод этой идеи из области философских спекуляций в плоскость строгой небесной механики (через частотно-зависимые числа Лява и резонансное захватывание) позволяет предложить конкретные вычислительные и наблюдательные тесты. Если эта гипотеза верна, то наблюдаемые сегодня планетные системы с биосферами представляют собой не просто случайные конфигурации, а результат длительного процесса взаимной подстройки компонентов через механизмы обратной связи. Система Солнце–Земля–Луна может служить иллюстрацией такого процесса.

Численный корпус настоящей работы (разделы 6.11.7–6.11.12, Рис. 1–7) включает четыре независимых результата: резервуарный захват мигрирующей планеты со считывателем, обученным исключительно на данных слепого сканирования; парадокс избыточной стабилизации, показывающий, что обитаемость требует сбалансированной, а не максимальной связи; палеоклиматический бенчмаркинг со стохастическим каталогом катастроф и контрфактическим ветвлением, в котором вклад спутника (подавление хаоса обликвити) измерим, а биотическое демпфирование при реалистичном полномочии честно зарегистрировано как нуль; и замкнутый контур с живой двухуровневой биосферой (термофилы, мезофилы, рефугии), демонстрирующий порог захвата по скорости миграции, два аттрактора биосферного режима и вырожденное окно стабилизации по усилению квадрупольного канала $[0, \gamma_{\text{over}}]$. Все нуль-результаты опубликованы рядом с положительными в соответствии с протоколом предрегистрации (раздел 8.4.3).

Таблица 10.1. Оригинальный вклад настоящей работы.

Существующие исследования	Наш вклад
Механизм Applegate: переменные квадрупольные звёзд в двойных системах [114, 115]	Мультиквадрупольное управление как механизм персонализированного воздействия звезды на конкретную планету
Измерения мультиполей планет миссиями Juno и GRACE [122, 138]	Интерпретация мультиполей как «весов» нейронной сети планеты/звезды

Измерения Love numbers экзопланет (WASP-12b, WASP-103b) [124, 125]	Биосфера как триггер изменения чисел Лява и запуска направленной стабилизации
Резонансное захватывание [75, 76, 109]	Резонансная селективность для многопланетных систем через мультиквадрупольные каналы
Гипотеза Гайи [3, 99, 100]	Формализация биосферы как сигнала качества R в уравнении обучения (2); биосфера как физический резервуар (раздел 5.1)
Физическое резервуарное вычисление [24–27, 30, 31]	Применение теории резервуарных вычислений к космическим объектам со сверхэкстремальными условиями
Нейронные сети как вычислительные устройства	Нейросетевая функциональность звёзд и планет: топологические узлы, веса (масса), пластичность (фазовые переходы)

Что биосфере даёт резервуарная архитектура? В классических моделях геологического углеродного цикла биосфера рассматривается как пассивный участник, реагирующий на изменения климата. В предлагаемой модели биосфера становится активным считывателем (readout) физического резервуара (звезда–планета), извлекая информацию из мультипольных мод и используя её для модуляции собственных параметров (вязкость мантии, альбедо, состав атмосферы). Это даёт биосфере три ключевых преимущества:

1. **Предсказательная способность:** благодаря затухающей памяти резервуара биосфера реагирует не на мгновенное состояние, а на историю воздействий, позволяя упреждающую адаптацию.
2. **Мультиплексирование каналов:** свойство разделения (separation) позволяет одному субстрату одновременно нести приливные, магнитные и композиционные сигналы, обеспечивая селективный отклик.
3. **Эмерджентная стабильность:** обучение без учителя (через $R_{\text{био}}$ как сигнал качества) приводит к селективному удержанию конфигураций, благоприятных для биосферы, без телеологии.

Таким образом, нейросетевая архитектура превращает биосферу из пассивного пассажира в активного участника долгосрочной эволюции планетной системы.

Глубочайший результат, на который претендует настоящая работа, состоит в том, что граница между релаксирующей и обучающейся материей является измеримой физической величиной, и что инструменты для её измерения существуют. Изложенная в разделе 8 исследовательская программа сформулирована на основе реалистичной оценки возможностей существующих и строящихся инструментов; задачи, требующие принципиально новых методик, отмечены как долгосрочные перспективы с указанием ожидаемого горизонта выполнения.

Сформулированные двадцать семь гипотез (H0–H4, включая H1.2, H1.3, H2.7) охватывают все аспекты основной темы — от самоорганизации вещества при сверхэкстремальных условиях до взаимодействия подсистем Триединой структуры — и сопровождаются явными фальсификаторами. Настоящая статья — приглашение сформировать сообщество, которое это сделает.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Доступность данных

Концептуальный синтез; численные результаты разделов 6.11.7–6.11.12 воспроизводимы: скрипты всех вычислительных модулей (Tier 0: `paleoshock_engine v3.2–v3.4`; Tier 1: `fig_drift_capture`, `fig_overstabilization`, `triune_master_coupled v5`, `triune_gamma_sweep`; прототип Tier 2: `triune_model v23`) и полные логи прогонов с предрегистрационными предсказаниями (раздел 8.4.3) будут депонированы в открытом репозитории при принятии статьи.

Декларация об использовании генеративного ИИ и ИИ-ассистирующих технологий

При подготовке данной работы автор использовал генеративные системы Qwen3.8-Max, GLM-5.3, DeepSeek, Alice AI (Яндекс) и GigaChat в качестве ассистентов для следующих задач:

— Поиск информации: поиск литературы и сбор данных по разнообразным дисциплинам, затронутым в статье, включая астрофизику, гелиосейсмологию, планетологию, биогеофизику, теорию динамических систем и резервуарные вычисления;

— Физический анализ: оценка физических явлений и эффектов на предмет применимости в математической модели, включая анализ механизмов связи между звёздными, планетарными и биосферными процессами, а также размерный аудит уравнений;

— Сборка модели: компоновка и интеграция системы уравнений модели Триединой структуры; — Генерация кода: разработка программного кода, реализующего модель (динамика резервуаров, каналы связи, процедуры валидации и якобианы);

— Библиографическая работа: оформление списка литературы; все позиции впоследствии верифицированы автором по первичным источникам; неверифицированные позиции исключены или заменены;

— Методологическая поддержка и подготовка черновиков: структурирование рукописи, согласование обозначений, предварительные текстовые заготовки отдельных разделов.

Перечисленные ИИ-инструменты не являются авторами работы, не удовлетворяют критериям авторства и не несут ответственности за её содержание.

Вклад автора:

— Концептуализация (исходная идея и концептуальная схема модели); верификация и валидация (независимая проверка всех количественных утверждений: размерный аудит, контрольные прогоны, сверка с аналитическими асимптотиками, выявление и исправление ошибок в ИИ-сгенерированном коде и библиографии, включая галлюцинированные позиции);

— Выполнение вычислений (все численные результаты получены прогоном кода на аппаратуре автора; логи и протокол предрегистрации предсказаний депонируются);

— Финальная правка (критическое редактирование всего текста с окончательным утверждением версии).

Автор отредактировал весь подготовленный ИИ контент и несёт полную ответственность за достоверность, целостность и точность опубликованной работы. После использования указанных инструментов автор проверил и отредактировал содержание по мере необходимости и принимает на себя полную ответственность за содержание публикации.

Список литературы

1. Вернадский В.И. Биосфера. М.: Наука, 1989. [Первое издание: 1926. Англ. пер.: Vernadsky V.I. The Biosphere. New York: Springer, 1998.] — DOI: 10.1007/978-1-4612-1750-3
2. Шрёдингер Э. Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. [Пер. с англ.: Schrödinger E. What is Life? Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1944.] — DOI: 10.1017/CBO9781139644129
3. Lovelock J.E., Margulis L. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis // *Tellus*. 1974. Vol. 26. P. 2–10. — DOI: 10.1111/j.2153-3490.1974.tb01946.x
4. Lloyd S. Computational capacity of the universe // *Phys. Rev. Lett.* 2002. Vol. 88. 237901. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.88.237901
5. Frank A., Grinspoon D.H., Walker S.I. Intelligence as a planetary-scale process // *Int. J. Astrobiol.* 2022. Vol. 21. P. 47–61. — DOI: 10.1017/S147355042100029X
6. Vanchurin V. The world as a neural network // *Entropy*. 2020. Vol. 22. P. 1210. — DOI: 10.3390/e22111210
7. Sherrington D., Kirkpatrick S. Solvable model of a spin-glass // *Phys. Rev. Lett.* 1975. Vol. 35. P. 1792–1796. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.35.1792
8. Hopfield J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1982. Vol. 79. P. 2554–2558. — DOI: 10.1073/pnas.79.8.2554
9. McCulloch W.S., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // *Bull. Math. Biophys.* 1943. Vol. 5. P. 115–133. — DOI: 10.1007/BF02478259
10. Hebb D.O. The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory. New York: Wiley, 1949. — DOI: 10.4324/9781410612403
11. Amit D.J., Gutfreund H., Sompolinsky H. Spin-glass models of neural networks // *Phys. Rev. A*. 1985. Vol. 32. P. 1007–1018. — DOI: 10.1103/PhysRevA.32.1007
12. Mézard M., Parisi G., Virasoro M.A. Spin Glass Theory and Beyond. Singapore: World Scientific, 1987. — DOI: 10.1142/0271
13. Fischer K.H., Hertz J.A. Spin Glasses. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991. — DOI: 10.1017/CBO9780511628771
14. Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes. I // *Phys. Rev.* 1931. Vol. 37. P. 405–426. — DOI: 10.1103/PhysRev.37.405
15. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems. New York: Wiley, 1977.
16. Still S., Sivak D.A., Bell A.J., Crooks G.E. Thermodynamics of prediction // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 109. 120604. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.120604

17. England J.L. Statistical physics of self-replication // *J. Chem. Phys.* 2013. Vol. 139. 121923. — DOI: 10.1063/1.4818538
18. Perunov N., Marsland R.A., England J.L. Statistical physics of adaptation // *Phys. Rev. X.* 2016. Vol. 6. 021036. — DOI: 10.1103/PhysRevX.6.021036
19. Kauffman S.A. Autocatalytic sets of proteins // *J. Theor. Biol.* 1986. Vol. 119. P. 1–24. — DOI: 10.1016/S0022-5193(86)80047-9
20. Crutchfield J.P., Young K. Inferring statistical complexity // *Phys. Rev. Lett.* 1989. Vol. 63. P. 105–108. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.63.105
21. Bialek W., Nemenman I., Tishby N. Predictability, complexity, and learning // *Neural Comput.* 2001. Vol. 13. P. 2409–2463. — DOI: 10.1162/089976601753195969
22. Jaeger H. The "echo state" approach to analysing and training recurrent neural networks. GMD Report 148. Bonn: German National Research Center for Information Technology, 2001.
23. Maass W., Natschläger T., Markram H. Real-time computing without stable states // *Neural Comput.* 2002. Vol. 14. P. 2531–2560. — DOI: 10.1162/089976602760407955
24. Tanaka G. et al. Recent advances in physical reservoir computing: a review // *Neural Networks.* 2019. Vol. 115. P. 100–123. — DOI: 10.1016/j.neunet.2019.03.005
25. Pathak J., Lu Z., Hunt B.R., Girvan M., Ott E. Using machine learning to replicate chaotic attractors // *Chaos.* 2017. Vol. 27. 121102. — DOI: 10.1063/1.5010300
26. Nakajima K. Physical reservoir computing — an introductory perspective // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 59. 060501. — DOI: 10.35848/1347-4065/ab8d4f
27. Stern M., Murugan A. Learning without neurons in physical systems // *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* 2023. Vol. 14. P. 417–441. — DOI: 10.1146/annurev-conmatphys-040821-113439
28. Dillavou B., Stern M., Liu A.J., Durian D.J. Demonstration of decentralized physics-driven learning // *Phys. Rev. Applied.* 2022. Vol. 18. 014040. — DOI: 10.1103/PhysRevApplied.18.014040
29. Song K.M. et al. Skyrmion-based artificial synapses for neuromorphic computing // *Nat. Electron.* 2020. Vol. 3. P. 148–155. — DOI: 10.1038/s41928-020-0385-0
30. Pandey S., Schumacher J. Reservoir computing model of two-dimensional turbulent convection // *Phys. Rev. Fluids.* 2020. Vol. 5. 113506. — DOI: 10.1103/PhysRevFluids.5.113506
31. Vidamour I.T. et al. Reconfigurable reservoir computing in a magnetic metamaterial // *Communications Physics.* 2023. Vol. 6. 230. — DOI: 10.1038/s42005-023-01352-4
32. Bak P., Tang C. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon // *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94. P. 15635–15637. — DOI: 10.1029/JB094iB11p15635
33. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation of the 1/f noise // *Phys. Rev. Lett.* 1987. Vol. 59. P. 381–384. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.59.381

34. Aschwanden M.J. Self-Organized Criticality in Astrophysics. Berlin: Springer, 2011. — DOI: 10.1007/978-3-642-15001-2
35. Sethna J.P., Dahmen K.A., Myers C.R. Crackling noise // *Nature*. 2001. Vol. 410. P. 242–250. — DOI: 10.1038/35065675
36. Beggs J.M., Plenz D. Neuronal avalanches in neocortical circuits // *J. Neurosci.* 2003. Vol. 23. P. 11167–11177. — DOI: 10.1523/JNEUROSCI.23-35-11167.2003
37. Muñoz M.A. Colloquium: criticality and dynamical scaling in living systems // *Rev. Mod. Phys.* 2018. Vol. 90. 031001. — DOI: 10.1103/RevModPhys.90.031001
38. Abe S., Suzuki N. Scale-free network of earthquakes // *Europhys. Lett.* 2004. Vol. 65. P. 581–586. — DOI: 10.1209/epl/i2003-10108-1
39. Lu E.T., Hamilton R.J. Avalanches and the distribution of solar flares // *Astrophys. J. Lett.* 1991. Vol. 380. P. L89–L92. — DOI: 10.1086/186180
40. Melatos A., Peralta C., Wyithe J.S.B. Avalanche dynamics of radio pulsar glitches // *Astrophys. J.* 2008. Vol. 672. P. 1103–1111. — DOI: 10.1086/523349
41. Dieterich J.H. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations // *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84. P. 2161–2168. — DOI: 10.1029/JB084iB05p02161
42. Ruina A.L. Slip instability and state variable friction laws // *J. Geophys. Res.* 1983. Vol. 88. P. 10359–10370. — DOI: 10.1029/JB088iB12p10359
43. Anderson P.W., Itoh N. Pulsar glitches and restlessness as a hard superfluidity phenomenon // *Nature*. 1975. Vol. 256. P. 25–27. — DOI: 10.1038/256025a0
44. Musielak Z.E., Rosner R., Ulmschneider P. Generation of flux tube waves in stellar convection zones. NASA TM-101152. 1987.
45. Monteforte M., Wolf F. Dynamic flux tubes form reservoirs of stability in neuronal circuits // *Phys. Rev. X.* 2012. Vol. 2(4). 041007. — DOI: 10.1103/PhysRevX.2.041007
46. Tremblay P.-E. et al. Core crystallization and pile-up in the cooling sequence of evolving white dwarfs // *Nature*. 2019. Vol. 565. P. 202–206. — DOI: 10.1038/s41586-018-0791-x
47. Blouin S., Daligault J., Saumon D. ^{22}Ne phase separation as a solution to the ultramassive white dwarf cooling anomaly // *Astrophys. J. Lett.* 2021. Vol. 911. L5. — DOI: 10.3847/2041-8213/abf14b
48. Wigner E., Huntington H.B. On the possibility of a metallic modification of hydrogen // *J. Chem. Phys.* 1935. Vol. 3(12). P. 764–770. — DOI: 10.1063/1.1749590
49. Knudson M.D. et al. Direct observation of an abrupt insulator-to-metal transition in dense liquid deuterium // *Science*. 2015. Vol. 348. P. 1455–1460. — DOI: 10.1126/science.aaa7471
50. McMahon J.M., Morales M.A., Pierleoni C., Ceperley D.M. The properties of hydrogen and helium under extreme conditions // *Rev. Mod. Phys.* 2012. Vol. 84. P. 1607–1653. — DOI: 10.1103/RevModPhys.84.1607

51. Wahl S.M. et al. Comparing Jupiter interior structure models to Juno gravity measurements and the role of a dilute core // *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44. P. 4649–4659. — DOI: 10.1002/2017GL073160
52. Thorne K.S., Żytkow A.N. Stars with degenerate neutron cores. I. Structure of equilibrium models // *Astrophys. J.* 1977. Vol. 212. P. 832–858. — DOI: 10.1086/155109
53. Levesque E.M., Massey P., Żytkow A.N., Morrell N. Discovery of a Thorne-Żytkow object candidate in the Small Magellanic Cloud // *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* 2014. Vol. 443. L94. — DOI: 10.1093/mnrasl/slu080
54. Beasor E.R., Davies B., Cabrera-Ziri I., Hurst G. A critical re-evaluation of the Thorne-Żytkow object candidate HV 2112 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2018. Vol. 479. P. 3101–3105. — DOI: 10.1093/mnras/sty1744
55. Rovelli C., Smolin L. Spin networks and quantum gravity // *Phys. Rev. D.* 1995. Vol. 52. P. 5743–5759. — DOI: 10.1103/PhysRevD.52.5743
56. Penrose R. On gravity's role in quantum state reduction // *Gen. Relativ. Gravit.* 1996. Vol. 28. P. 581–600. — DOI: 10.1007/BF02105068
57. Susskind L. The world as a hologram // *J. Math. Phys.* 1995. Vol. 36. P. 6377–6396. — DOI: 10.1063/1.531249
58. Almheiri A., Engelhardt N., Marolf D., Maxfield H. The entropy of bulk quantum fields and the entanglement wedge of an evaporating black hole // *JHEP.* 2019. Vol. 12. 063. — DOI: 10.1007/JHEP12(2019)063
59. Poisson E., Israel W. Internal structure of black holes // *Phys. Rev. D.* 1990. Vol. 41. P. 1796–1809. — DOI: 10.1103/PhysRevD.41.1796
60. Ori A. Inner structure of a charged black hole: an exact mass-inflation solution // *Phys. Rev. Lett.* 1991. Vol. 67. P. 789–792. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.67.789
61. Schäfer T., Shuryak E.V. Instantons in QCD // *Rev. Mod. Phys.* 1998. Vol. 70. P. 323–426. — DOI: 10.1103/RevModPhys.70.323
62. Kibble T.W.B. Topology of cosmic domains and strings // *J. Phys. A.* 1976. Vol. 9. P. 1387–1398. — DOI: 10.1088/0305-4470/9/8/029
63. Ravenhall D.G., Pethick C.J., Wilson J.R. Structure of matter below nuclear saturation density // *Phys. Rev. Lett.* 1983. Vol. 50. P. 2066–2069. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.50.2066
64. Horowitz, C. J., Hughto, J., Schneider, A., & Berry, D. K. «Disordered nuclear pasta, magnetic field decay, and crust cooling in neutron stars». 2015, *Phys. Rev. Lett.* 114, 031102. — DOI: 10.1103/physrevlett.114.031102
65. Caplan M.E., Horowitz C.J. Astromaterial science and nuclear pasta // *Rev. Mod. Phys.* 2017. Vol. 89. 041002. — DOI: 10.1103/RevModPhys.89.041002
66. Alford M., Schmitt A., Rajagopal K., Schäfer T. Color superconducting quark matter // *Rev. Mod. Phys.* 2008. Vol. 80. P. 1455–1515. — DOI: 10.1103/RevModPhys.80.1455

67. Lattimer J.M., Prakash M. Neutron star observations: prognosis for equation of state constraints // *Phys. Rep.* 2007. Vol. 442. P. 109–165. — DOI: 10.1016/j.physrep.2007.02.003
68. Fortov V.E. *Extreme States of Matter*. Berlin: Springer, 2011. — DOI: 10.1007/978-3-642-16464-4
69. Pochodzalla J. et al. Probing the nuclear liquid-gas phase transition // *Phys. Rev. Lett.* 1995. Vol. 75. P. 1040–1043. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.75.1040
70. Christensen-Dalsgaard J. Helioseismology // *Rev. Mod. Phys.* 2002. Vol. 74. P. 1073–1129. — DOI: 10.1103/RevModPhys.74.1073
71. García R.A. et al. Tracking solar gravity modes: the dynamics of the solar core // *Science*. 2007. Vol. 316. P. 1591–1593. — DOI: 10.1126/science.1140598
72. Charbonneau P. Dynamo models of the solar cycle // *Living Rev. Sol. Phys.* 2010. Vol. 7. P. 3. — DOI: 10.12942/lrsp-2010-3
73. Ogilvie G.I., Lin D.N.C. Tidal dissipation in rotating giant planets // *Astrophys. J.* 2004. Vol. 610. P. 477–509. — DOI: 10.1086/421454
74. Goodman J., Lackner C. Dynamical tides in rotating planets and stars // *Astrophys. J.* 2009. Vol. 696. P. 2054–2065. — DOI: 10.1088/0004-637X/696/2/2054
75. Lainey V. et al. Resonance locking in giant planets indicated by the rapid orbital expansion of Titan // *Nat. Astron.* 2020. Vol. 4. P. 1053–1058. — DOI: 10.1038/s41550-020-1120-5
76. Ma L., Fuller J. Orbital decay of short-period exoplanets via tidal resonance locking // *Astrophys. J. Lett.* 2021. Vol. 920. L1. — DOI: 10.3847/1538-4357/ac088e
77. Shkolnik E.L., Walker G.A.H., Bohlender D.B. Evidence for planet-induced chromospheric activity on HD 179949 // *Astrophys. J.* 2003. Vol. 597. P. 1092–1096. — DOI: 10.1086/378583
78. Cauley P.W., Shkolnik E.L., Llama J., Lanza A.F. Magnetic field strengths of hot Jupiters from signals of star–planet interactions // *Nat. Astron.* 2019. Vol. 3. P. 1128–1134.
79. Strugarek A. Models of star-planet magnetic interaction // *Handbook of Exoplanets* / Ed. by H.J. Deeg, J.A. Belmonte. Cham: Springer, 2016. P. 1–22. — DOI: 10.1007/978-3-319-30648-3_25-1
80. Farihi J. Circumstellar debris and pollution at white dwarf stars // *New Astron. Rev.* 2016. Vol. 71. P. 9–34. — DOI: 10.1016/j.newar.2016.03.001
81. Jackson B., Carlberg J. Accretion of planetary material onto host stars // *Handbook of Exoplanets* / Ed. by H. Deeg, J. Belmonte. Cham: Springer, 2018. P. 1895–1912. — DOI: 10.1007/978-3-319-55333-7_28
82. Yee S.W., Winn J.N., Knutson H.A. et al. The orbit of WASP-12b is decaying // *Astrophys. J. Lett.* 2020. Vol. 888. L5. — DOI: 10.3847/2041-8213/ab5c16
83. Wolfenstein L. Neutrino oscillations in matter // *Phys. Rev. D.* 1978. Vol. 17. P. 2369–2374. — DOI: 10.1103/PhysRevD.17.2369

84. Mikheyev S.P., Smirnov A.Yu. Resonant amplification of neutrino oscillations in matter // Nuclear Physics. 1985. Vol. 42. P. 1441–1448.
85. Akimov D. et al. (COHERENT Collaboration). Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering // Science. 2017. Vol. 357. P. 1123–1126. — DOI: 10.1126/science.aao0990
86. Formaggio J.A., Zeller G.P. From eV to EeV: neutrino cross sections across energy scales // Rev. Mod. Phys. 2012. Vol. 84. P. 1307–1341. — DOI: 10.1103/RevModPhys.84.1307
87. Huber P. Determination of antineutrino spectra from nuclear reactors // Phys. Rev. C. 2011. Vol. 84. 024617. — DOI: 10.1103/PhysRevC.84.024617
88. Duan H., Fuller G.M., Qian Y.-Z. Collective neutrino oscillations // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2010. Vol. 60. P. 569–594. — DOI: 10.1146/annurev.nucl.012809.104524
89. Yakovlev D.G., Pethick C.J. Neutron star cooling // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2004. Vol. 42. P. 169–210. — DOI: 10.1146/annurev.astro.42.053102.134013
90. Friman B.L., Maxwell O.V. Neutrino emissivities of neutron stars // Astrophys. J. 1979. Vol. 232. P. 541–548. — DOI: 10.1086/157313
91. Itoh N., Hayashi H., Nishikawa A., Kohyama Y. Neutrino energy loss in stellar interiors. VII // Astrophys. J. Suppl. 1996. Vol. 102. P. 411–422. — DOI: 10.1086/192264
92. Raffelt G.G. Stars as Laboratories for Fundamental Physics. Chicago: Univ. of Chicago Press, 1996.
93. Abe K. et al. (Super-Kamiokande Collaboration). Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-IV // Phys. Rev. D. 2016. Vol. 94. 052010. — DOI: 10.1103/PhysRevD.94.052010
94. Araki T. et al. (KamLAND Collaboration). Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND // Nature. 2005. Vol. 436. P. 499–503. — DOI: 10.1038/nature03980
95. Bellini G. et al. (Borexino Collaboration). Observation of geo-neutrinos // Phys. Lett. B. 2010. Vol. 687. P. 299–304. — DOI: 10.1016/j.physletb.2010.03.051
96. Agostini M. et al. (Borexino Collaboration). Comprehensive measurement of pp-chain solar neutrinos // Nature. 2018. Vol. 562. P. 505–510. — DOI: 10.1038/s41586-018-0624-y
97. Bellini G. et al. (Borexino Collaboration). Neutrinos from the primary proton–proton fusion process in the Sun // Nature. 2014. Vol. 512. P. 383–386. — DOI: 10.1038/nature13702
98. Hirata K. et al. (Kamiokande-II Collaboration). Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. P. 1490–1493. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.58.1490
99. Lenton T.M. Gaia and natural selection // Nature. 1998. Vol. 394. P. 439–447. — DOI: 10.1038/28792
100. Lenton T.M., Latour B. Gaia 2.0 // Science. 2018. Vol. 361. P. 1066–1068. — DOI: 10.1126/science.aau0427

101. Schwartzman D.W., Volk T. Biotic enhancement of weathering and the habitability of Earth // *Nature*. 1989. Vol. 340. P. 457–460. — DOI: 10.1038/340457a0
102. Schumann W.O. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel // *Z. Naturforsch. A*. 1952. Vol. 7. P. 149–154. — DOI: 10.1515/zna-1952-0202
103. Watson A.J., Lovelock J.E. Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld // *Tellus B*. 1983. Vol. 35. P. 284–289. — DOI: 10.3402/tellusb.v35i4.14616
104. Svensmark H., Friis-Christensen E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage — a missing link in solar-climate relationships // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. Vol. 59. P. 1225–1232. — DOI: 10.1016/S1364-6826(97)00001-1
105. Lockwood M., Fröhlich C. Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature // *Proc. R. Soc. A*. 2007. Vol. 463. P. 2447–2460. — DOI: 10.1098/rspa.2007.1880
106. Sloan T., Wolfendale A.W. Testing the proposed causal link between cosmic rays and cloud cover // *Environ. Res. Lett.* 2008. Vol. 3. 024001. — DOI: 10.1088/1748-9326/3/2/024001
107. Catling D.C., Zahnle K.J., McKay C.P. Biogenic methane, hydrogen escape, and the irreversible oxidation of early Earth // *Science*. 2001. Vol. 293. P. 839–843. — DOI: 10.1126/science.1061976
108. Arney G., Trainer M. G., et al. The Pale Orange Dot: The Spectrum and Habitability of Hazy Archean Earth // 2016, *Astrobiology*, 16(11), 873–899. — DOI: 10.1089/ast.2015.1422
109. Fuller J., Luan J., Quataert E. Resonance locking as the source of rapid tidal migration in the Jupiter and Saturn moon systems // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016. Vol. 458(4). P. 3867–3879. — DOI: 10.1093/mnras/stw609
110. Meadows V.S., Reinhard C.T., Arney G.N. et al. Exoplanet Biosignatures: Understanding Oxygen as a Biosignature in the Context of Its Environment // *Astrobiology*. 2018. Vol. 18(6). P. 630–662. — DOI: 10.1089/ast.2017.1727
111. Schwieterman, E. W., Kiang, N. Y., Parenteau, M. N., et al. Exoplanet Biosignatures: A Review of Remotely Detectable Signs of Life // *Astrobiology*. 2018. Vol. 18(6). P. 663–708. — DOI: 10.1089/ast.2017.1729
112. Laskar J., Joutel F., Robutel P. Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon // *Nature*. 1993. Vol. 361. P. 615–617. — DOI: 10.1038/361615a0
113. Auclair-Desrotour P., Mathis S., Poncin-Lafitte C. Le. Impact of the frequency dependence of tidal Q on the evolution of planetary systems // *A&A* 561, L7 (2014). P. 4 — DOI: 10.1051/0004-6361/201322782
114. Applegate J.H. A mechanism for orbital period modulation in close binaries // *Astrophys. J.* 1992. Vol. 385, Part 1. P. 621–629. — DOI: 10.1086/170967
115. Lanza A.F., Rodonò M. Orbital period modulation and magnetic cycles in close binaries // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 296 (4). 1999. P. 893–902. — DOI: 10.1046/j.1365-8711.1998.01446.x

116. Lanza A.F. Internal stellar rotation and orbital period modulation in close binary systems // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2006. Vol. 369(4). P. 1773–1779. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.10415.x
117. Völschow M., Schleicher D.R.G., Perdelwitz V., Banerjee R. Eclipsing time variations in close binary systems: Planetary hypothesis vs. Applegate mechanism // *Astron. Astrophys.* 2016. Vol. 587. A62. — DOI: 10.1051/0004-6361/201527333
118. Marsh T.R., Pringle J.E. Changes in the orbital periods of close binary stars // *Astrophys. J.* 1990. Vol. 365. P. 677. — DOI: 10.1086/169521
119. Kirchner J.W. The Gaia hypothesis: fact, theory, and wishful thinking // *Clim. Change.* 2002. Vol. 52. P. 391–408. — DOI: 10.1023/A:1014237331082
120. Tyrrell T. *On Gaia: A Critical Investigation of the Relationship between Life and Earth.* Princeton: Princeton Univ. Press, 2013.
121. Doolittle W.F. Darwinizing Gaia // *J. Theor. Biol.* 2017. Vol. 434. P. 11–19. — DOI: 10.1016/j.jtbi.2017.02.015
122. Durante D., Guillot T., Iess L. et al. Juno spacecraft gravity measurements provide evidence for normal modes of Jupiter // *Nat. Commun.* 2022. Vol. 13. Article 4632. — DOI: 10.1038/s41467-022-32299-9
123. Voisin G., Clark C.J., Breton R.P. et al. First measurement of the total gravitational quadrupole moment of a black widow companion // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2020. Vol. 494(3). P. 4448–4453. — DOI: 10.1093/mnras/staa953
124. Akisanmi B., Barros S.C.C., Demangeon O.D.S. et al. The tidal deformation and atmosphere of WASP-12 b from its phase curve // *Astron. Astrophys.* 2024. Vol. 685. A63. — DOI: 10.1051/0004-6361/202348502
125. Barros S.C.C., Akisanmi B., Boué G. et al. Detection of the tidal deformation of WASP-103 b with CHEOPS // *Astron. Astrophys.* 2022. Vol. 657. A52. — DOI: 10.1051/0004-6361/202142196
126. Carter J.A., Winn J.N. Empirical constraints on the oblateness of an exoplanet // *Astrophys. J.* 2010. Vol. 709(2). P. 1219–1224. — DOI: 10.1088/0004-637X/709/2/1219
127. Vazza F., Feletti A. The quantitative comparison between the neuronal network and the cosmic web // *Front. Phys.* 2020. Vol. 8. 525731. — DOI: 10.3389/fphy.2020.525731
128. Krioukov D., Kitsak M., Sinkovits R.S. et al. Network cosmology // *Sci. Rep.* 2012. Vol. 2. P. 793. — DOI: 10.1038/srep00793
129. Horowitz C.J., Kadau K. Breaking strain of neutron star crust and gravitational waves // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102. 191102. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.191102
130. Alpar M.A., Anderson P.W., Pines D., Shaham J. Vortex creep and the internal temperature of neutron stars. I. General theory // *Astrophys. J.* 1984. Vol. 276. P. 325–334. — DOI: 10.1086/161616

131. van Horn H.M. Crystallization of white dwarfs // *Astrophys. J.* 1968. Vol. 151. P. 227–238. — DOI: 10.1086/149432
132. Millot M. et al. Experimental evidence for superionic water ice using shock compression // *Nat. Phys.* 2018. Vol. 14. P. 297–302. — DOI: 10.1038/s41567-017-0017-4
133. Millot M. et al. Nanosecond X-ray diffraction of shock-compressed superionic water ice // *Nature*. 2019. Vol. 569. P. 251–255. — DOI: 10.1038/s41586-019-1114-6
134. Redmer R., Mattsson T.R., Nettelmann N., French M. The phase diagram of water and the magnetic fields of Uranus and Neptune // *Icarus*. 2011. Vol. 211. P. 798–803. — DOI: 10.1016/j.icarus.2010.08.008
135. Glatzmaier G.A., Roberts P.H. A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal // *Nature*. 1995. Vol. 377. P. 203–209. — DOI: 10.1038/377203a0
136. Biggin A.J. et al. Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes // *Nat. Geosci.* 2012. Vol. 5. P. 526–533. — DOI: 10.1038/ngeo1521
137. Stello D. et al. A prevalence of dynamo-generated magnetic fields in the cores of intermediate-mass stars // *Nature*. 2016. Vol. 529. P. 364–367. — DOI: 10.1038/nature16171
138. Tapley B.D., Watkins M.M., Flechtner F. et al. Contributions of GRACE to understanding climate change // *Nat. Clim. Change*. 2019. Vol. 9. P. 358–369. — DOI: 10.1038/s41558-019-0456-2
139. Moulton, K. L., & Berner, R. A. (1998). Quantification of the effect of plants on weathering: Studies with Icelandic river waters. *Geology*, 26(10), 899-902. — DOI: 10.1130/0091-7613(1998)026<0895:QOTEOP>2.3.CO;2
140. Hirth, G., Kohlstedt, D. L. Water in the Earth's mantle. *Physics Today*. 2012. Vol. 65(3). — DOI: 10.1063/pt.3.1476.
141. Höning D. The impact of life on climate stabilization over different timescales // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2020. Vol. 21. e2020GC009105. — DOI: 10.1029/2020GC009105.
142. Hirth G., Kohlstedt D.L. Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: a view from the experimentalists // *Inside the Subduction Factory*. AGU GM 138. 2003. P. 83–105. – DOI: 10.1029/138GM06.
143. Efroimsky M., Makarov V.V. Tidal Dissipation in a Homogeneous Spherical Body. I. Methods // *The Astrophysical Journal*. 2014. Vol. 795. 6. — DOI: 10.1088/0004-637X/795/1/6.
144. Lainey V., et al. Tidal frequency dependence of the Saturnian k2 Love number // *Astron. Astrophys.* 2024. Vol. 684. L3. – DOI: 10.1051/0004-6361/202449639.
145. Murray C.D., Dermott S.F. *Solar System Dynamics*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2012. – DOI: 10.1017/CBO9781139174817.
146. Kashefi E.A., Lovley D.R. Extending the upper temperature limit for life // *Science*. 2003. Vol. 301. P. 937. – DOI: 10.1126/science.1086823.

147. Weiss M.C., et al. The physiology and habitat of the last universal common ancestor // *Nat. Microbiol.* 2016. Vol. 1. 16116. — DOI: 10.1038/nmicrobiol.2016.116.
148. Groussin M., Boussau B., Charles S., Blanquart S., Gouy M. The molecular signal for the adaptation to cold temperature during early life on Earth // *Biology Letters.* 2013. Vol. 9(4). 20130608. — DOI: 10.1098/rsbl.2013.0608.
149. Galtier N., Tourasse N., Gouy M. A nonhyperthermophilic common ancestor to extant life forms // *Science.* 1999. Vol. 283. P. 220–221. — DOI: 10.1126/science.283.5399.220.
150. Gough D.O. Solar interior structure and luminosity variations // *Sol. Phys.* 1981. Vol. 74. P. 21–34. — DOI: 10.1007/BF00151270.
151. Berner R.A. Weathering, plants, and the long-term carbon cycle // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* — 1992. — Vol. 56, No. 8. — P. 3225–3231. — DOI: 10.1016/0016-7037(92)90300-8.

Приложение 1. Предельные случаи: чёрные дыры, экзотические звёзды и элементарные частицы

Спекулятивный характер настоящего раздела. Настоящий раздел содержит гипотезы, находящиеся на границе современной теоретической физики и в настоящее время не поддающиеся прямой экспериментальной проверке. Их включение мотивировано стремлением указать на возможную универсальность сетевого описания материи в предельно экстремальных условиях, а не утверждением их доказанности.

Доводя гипотезу до теоретического предела, рассмотрим вопрос: существуют ли сетевые структуры в предельно экстремальных условиях — внутри чёрных дыр, в экзотических звёздных объектах и на уровне элементарных частиц? Хотя такие построения носят спекулятивный характер, они опираются на серьёзные теоретические разработки и указывают на возможную универсальность сетевого описания материи.

Экзотические звёздные конфигурации: объекты Торна–Житков. Особо следует упомянуть гипотетические объекты Торна–Житков [52] — звёзды с нейтронным ядром внутри оболочки красного сверхгиганта. Такие конфигурации представляют собой естественный пример вложенной сетевой структуры: сеть нейтронной звезды (ядерная паста, вихри, флюксоиды) погружена в конвективную сеть внешней оболочки. Аккреция вещества оболочки на нейтронное ядро создаёт долгоживущий канал связи между двумя масштабами — звёздным и ядерным. Следует отметить, что наблюдательный статус этого класса объектов остаётся

неподтверждённым: ведущий кандидат, звезда HV 2112 в Малом Магеллановом Облаке, предложенный в [53], был оспорен в работе [54], где показано, что её наблюдаемые свойства могут быть объяснены без привлечения нейтронного ядра. Таким образом, объекты Торна–Житкова сохраняют статус гипотетических.

Чёрные дыры: топология пространства-времени как сеть. В рамках петлевой квантовой гравитации пространство-время на планковском масштабе описывается спиновыми сетями (spin networks) Ровелли–Смолина [55] — комбинаторными графами, рёбрам которых сопоставлены квантовые числа площади, а узлам — квантовые числа объёма. Эволюция такой сети во времени описывается спиновой пеной (spin foam). В этом представлении сама геометрия пространства-времени является дискретной сетевой структурой с метастабильными состояниями и пороговой динамикой. Родственные идеи содержатся в работах Пенроуза о роли гравитации в квантовой редукции [56]. Голографический принцип 'т Хоофта–Сасскинда [57] утверждает, что информация, содержащаяся в объёме, кодируется на его границе; для чёрной дыры это горизонт событий, который может быть представлен как сетевая структура с плотностью степеней свободы, пропорциональной площади (энтропия Бекенштейна–Хокинга). Информационный парадокс и его современное разрешение через кривую Пейджа [58] предполагают, что информация о падающем веществе сохраняется в тонкой структуре горизонта и, возможно, во внутренней структуре — в частности, вблизи горизонта Коши, где происходит явление зарядового раздувания массы (mass inflation) [59, 60], — что требует сетевой организации для её кодирования.

Элементарные частицы: топология КХД-вакуума. Внутри нуклона кварк-глюонная плазма (КХД-вакуум) демонстрирует богатую топологическую структуру: инстантоны и сфалероны представляют собой локализованные топологические возбуждения, образующие «инстантонную жидкость» [61] — среду с нетривиальной сетевой топологией, способную к фазовым переходам и хранению топологического заряда. Явление конфайнмента описывается через образование глюонных струн (flux tubes) между кварками, которые образуют временную сетевую структуру. В ранней Вселенной фазовые переходы могли приводить к образованию топологических дефектов — космических струн, доменных стенок, монополей [62] — которые формируют долгоживущие сетевые структуры космологического масштаба.

Функциональная аналогия из локального структурирования. В однородной среде локальное структурирование (изменение плотности, температуры, химического потенциала)

может создавать области с функциональными свойствами, аналогичными различным веществам. Этот принцип наблюдается на всех уровнях масштаба:

Ядерное вещество. Протоны и нейтроны образуют уравнение состояния типа Ван-дер-Ваальса: при низких температурах и высоких плотностях — жидкость (обычные ядра как «капли ферми-жидкости»), при нагреве — газ свободных нуклонов. В недрах нейтронных звёзд то же ядерное вещество образует «пасту» — структуры, являющиеся прямыми аналогами жидких кристаллов: сферические ядра (gnocchi), цилиндрические стержни (spaghetti), плоские слои (lasagna), цилиндрические пустоты (tubes), сферические пузырьки (bubbles). Упругие свойства пасты количественно описываются теорией жидких кристаллов [63–65].

Кварк-глюонная плазма. Однородная среда кварков и глюонов проходит через ряд фаз: адронный газ (конфайнмент), кварк-глюонная плазма (сильно связанная «идеальная жидкость» с экстремально малой вязкостью), цветная сверхпроводимость. Особо интересна LOFF-фаза (кристаллический цветной сверхпроводник): кварки образуют куперовские пары с ненулевым суммарным импульсом, создавая периодическую модуляцию конденсата — кристалл, одновременно сверхтекучий и твёрдый, в 20–1000 раз жёстче коры обычной нейтронной звезды [66].

Вырожденное вещество. В белых карликах и нейтронных звёздах один и тот же вырожденный ферми-газ формирует спектр состояний: кулоновский кристалл ионов (аналог металла), ядерная паста (жидкий кристалл), сверхтекучая ядерная жидкость, возможно кварковое вещество [67, 68].

Металлический водород. В ядрах планет-гигантов водород проходит через последовательность фаз: молекулярный изолятор → атомный металл → жидкий металл → твёрдый металлический водород (возможно сверхпроводящий). Переход молекулярного водорода в металл при давлениях планетных ядер — не скачкообразный, а плавный кроссовер [50].

Тёплое плотное вещество (Warm Dense Matter). Режим между твёрдым телом и плазмой: плотности порядка твёрдых тел, температуры порядка энергии Ферми. Реализуется в ядрах планет и в мишенях термоядерного синтеза [69].

Фазовые переходы в ранней Вселенной. Однородная среда квантовых полей проходила через серию симметричных фазовых переходов: большое объединение, электрослабый переход (механизм Хиггса), QCD-переход (конфайнмент). Каждый переход может быть первого рода (пузырьковая нуклеация) или второго рода (плавный кроссовер) [6].

Ключевой принцип: неоднородности и взаимодействия порождают фазы из одной среды. Меняются температура, плотность, химический потенциал — и та же среда кристаллизуется, течёт, испаряется или становится сверхтекучей. Этот принцип усиливает основную гипотезу статьи: нейросетевая функциональность определяется не составом субстрата, а структурой взаимодействий, которая может быть создана локальным структурированием даже в однородной среде.

Следует подчеркнуть, что эти построения находятся на границе современной теоретической физики и в настоящее время не поддаются прямой экспериментальной проверке. Однако они демонстрируют, что сетевая парадигма возникает независимо в самых различных разделах фундаментальной физики при описании экстремальных состояний материи, что придаёт дополнительную мотивацию программе, излагаемой в настоящей статье.

Приложение 2. Каталог каналов и численная архитектура гиперграфа Tier-2

Настоящее приложение специфицирует полную численную реализацию Триединой структуры (версия 23, предоставлена независимым экспертным модулем) как прототип иерархии Tier-2: 18 каналов связи (6 прямых, 6 прямых метаканалов, 6 обратных метаканалов) с более чем 70 эффектами-кандидатами; 6 прямых и 7 обратных каналов спутника с критическими радиусами орбиты $66.5 R_{\oplus}$ (резонанс s_3 , хаотический наклон оси) и $68 R_{\oplus}$ (резонанс s_6); резервуарную архитектуру с трёхмерным размещением узлов (звезда: N магнитных трубок в оболочке $0.69\text{--}1.0 R_{\odot}$ с квадрупольным весом считывателя $\alpha_i \propto r_i^2 \sin^2 \theta_i \cos 2\varphi_i$; планета: M конвективных ячеек в оболочке внешнего ядра $0.19\text{--}0.55 R_{\oplus}$); двухуровневую биосферу с рефугиями (термофилы $T_{\text{opt}} = 353 \text{ K}$, $T_{\text{max}} = 395 \text{ K}$ по Kashefi & Lovley 2003; мезофилы $T_{\text{opt}} = 288 \text{ K}$; хемосинтетические рефугии с утечкой при $T < 333 \text{ K}$); частотно-зависимые числа Лява (модель Андраде–Максвелла плюс океанский резонанс, Makarov & Efroimsky 2022; Lainey et al. 2024) как строгую форму канала H1.1; механизм Апплгейта с фазовой когерентностью $\sin \Delta\varphi$ и ограничителем перезарядки резервуара γ_{max} ($\Delta E/E_{\text{sec}} < 1$ по Lanza 2006; осуществимость в 4 из 16 систем по Völschow et al. 2016).

Полная система содержит $D = 6N + 14$ обыкновенных дифференциальных уравнений; интегрирование — неявный метод BDF с аналитическим якобианом и адаптивным шагом ($\sim 2 \cdot 10^5$

шагов на 4.5 млрд лет); оценочная стоимость прогона на конфигурации i7-13400KF + RTX 4080 приведена в таблицах 9.1–9.2 спецификации ($N = 3000 \rightarrow \sim 1$ час CPU+GPU), что делает абляционную проверку гипотезы Н1.2 (задача 8.3.11) практически выполнимой.

Размерный аудит прототипа v23: углеродный цикл переведён в потоковую форму Уокера (вулканизм $7 \cdot 10^{12}$ моль/год, пул $2.13 \cdot 10^{12}$ моль/ррт, степенная зависимость выветривания от CO_2); в резонансном гейте используется модуль синодической приливной частоты $2|\omega_{\text{orb}} - \Omega_s|$ при расширенном спектре g-мод; знак звёздного прилива приведён в соответствие Hut (1981) (расширение орбиты при $\Omega_s > n$); масштабный коэффициент A_{app} калиброван по физической амплитуде $\Delta Q_{\text{xx}} \approx \Delta J_2 \cdot M_s \cdot R_s^2 \approx 3 \cdot 10^{38} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ при $\Delta J_2 \sim 10^{-9}$; стартовая полуось приведена в соответствие объявленному сценарному дрейфу. Слабые источники спецификации (вики-страницы, агрегаторы) заменены первичной литературой в позициях [135]–[138] и в тексте разделов 2.2, 3.1, 6.0.4, 6.9.2. Критерий баланса гиперграфа $\Sigma|\text{прямые}| \approx \Sigma|\text{обратные}| \rightarrow \lambda \approx 0$ принят как операционализация удержания системы на границе хаоса и как метрика абляционной проверки Н1.2.