Никитин А.В.

СЛУЧАЙНОСТЬ.

В парадигме потока случайностей.

Аннотация

Случайность принято понимать как непредсказуемость. Но у этого слова два разных значения, и наука различает их с трудом. Одно — совпадение причинных цепей, измеримое вероятностью. Другое — самопроизвольность, не сводимая ни к какой причине.

Первая книга серии «В парадигме потока случайностей» начинается с античного различения тюхэ и автоматона и показывает, что наука Нового времени удержала только первое. Квантовая механика открыла второе заново, но описала его тем же языком теории вероятностей — и различение вновь исчезло.

Случайность здесь — не только свойство события, а материальный контакт, оставляющий след. След необратим, накапливается и становится памятью. Память делает следующую случайность зависимой от предыдущих. Из этого вырастает поток — иерархия накопления следов от квантовых флуктуаций до макроскопических разрушений.

Сквозной пример — рост трещины в оконном стекле. Через него показано, что случайность не разрушает порядок, а порождает его.

Для читателей, интересующихся философией науки, физикой неравновесных процессов и теорией сложности.

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

1. ВВЕДЕНИЕ: СЛУЧАЙНОСТЬ КАК ПРОБЛЕМА 3

1.1. Что такое случайность? 3
1.2. Тюхэ и автоматон 4
1.3. Утрата различения 4
1.4. Парадокс масштаба 5

2. ПРИРОДА СЛУЧАЙНОСТИ 6

2.1. Определение случайности 6
2.2. Источник случайностей 7
2.3. След: материальность, локальность, масштаб 7
2.4. Память: след как механизм 8
2.5. Разнообразие и энтропия 9
2.6. Пять свойств случайности 11
2.7. Накопление и старение 12

3. ПОТОК СЛУЧАЙНОСТЕЙ 12

3.1. Определение потока 14
3.2. Иерархия уровней 14
3.3. Законы равновесия 15
3.3.1. Масштабирование числа случайностей 15

3.3.2. Статистическая предсказуемость *17*
3.4. Законы потока 17
3.4.1. Масштабная инвариантность *17*
3.4.2. Направленность потока *18*
3.4.3. Трансформация материальности *18*
3.4.4. Кумулятивность *19*
3.4.5. Критические зоны и пороговая активация *20*
3.4.6. Закон совпадений *20*
3.5. Меры потока 21
3.5.1. Параметр ψ — кластеризация *21*
3.5.2. Параметр H — память *22*
3.5.3. Параметр TE — направленность *22*
3.5.4. Параметр D — разнообразие *23*
3.5.5. Таблица 2. Четыре меры потока *23*
3.5.6. Практические оценки *23*
3.5.7. ψ-градиент иерархии *23*
3.6. Недостижимость полюсов 24
3.6.1. Полюс ψ = 0: исчезновение кластеризации *24*
3.6.2. Полюс ψ = 1: предельная кластеризация *24*
3.6.3. ψ = 0,5: чистая случайность (пуассоновский процесс) *25*
3.6.4. Область существования потока *25*
3.7. Объективная связность потока 26
3.8. Свойства потока 26

4. ПРОВЕРКА, ИЗМЕРЕНИЯ 27

4.1. Соответствие законам физики 27
4.2. Фальсифицируемость 28
4.3. Экспериментальные подтверждения 28
4.4. Сквозной пример: рост трещины в стекле — итог 29
4.5. Что требует уточнения 30

ГЛОССАРИЙ 30

БИБЛИОГРАФИЯ 32

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта серия состоит из четырёх книг. Каждая самостоятельна, но все они связаны одной парадигмой — парадигмой потока случайностей. Читать их можно по отдельности; читать подряд — значит пройти путь от первичного акта к его последствиям.

«Случайность» вводит первичную категорию: случайность как свойство события, точнее — как его начало. Здесь появляются ключевые понятия: след, поток случайностей, пороговая активация, разнообразие, мера Хёрста. Случайность — то, из чего всё возникает. След — то, что остаётся.

«Хаос» описывает состояние: случайности уже связаны памятью, но ещё не упорядочены в целое. Здесь разбирается история понятия хаоса — от античного до математического, — показываются достижения и границы математической теории хаоса, вводится различение марковского и немарковского хаоса и формулируется центральное тождество серии: внутренний хаос целого есть множество накопленных в нём следов. Автомат превращает накопленные следы в действие.

«Автомат» — целое, способное к самодействию. Он — то, что отбор отобрал из множества форм, порождённых хаосом. Хаос создаёт вариации, отбор удерживает те, что способны существовать. И все эти отобранные вариации – автоматы.

«Наблюдатель» — автомат с надстройкой самоуправления. Надстройка позволяет ему строить модели из опыта и прогнозировать «что будет, если...» в потоке случайностей. Здесь описывается, как из давления среды вырастает самоуправление и как отбор закрепляет тех, у кого прогноз точнее.

Сквозной пример, проходящий через все четыре книги, — рост трещины в оконном стекле. От квантовой флуктуации в решётке до макроскопического разрушения. Один процесс на всех уровнях.

Серия не предлагает новых математических инструментов. Она предлагает новый способ видеть: вместо случайного события — материальный след, вместо распределения — траектория накопления, вместо ансамбля — конкретная система с историей. Парадигма потока случайностей собирает существующие инструменты — уравнение Мори–Цванцига, индекс Фано, показатель Хёрста, передаточную энтропию, индекс Симпсона, закон Эшби — в единую концептуальную рамку.

1. ВВЕДЕНИЕ: СЛУЧАЙНОСТЬ КАК ПРОБЛЕМА

У случайности дурная репутация. О ней говорят, когда хотят сказать: «здесь нет причины». Между тем случайность — начало всякого случайного события. Не отсутствие причины вообще, а отсутствие причины внешней. Самопроизвольность — способ, которым новое входит в мир.

Как описать случайность не помехой порядку, а его источником? Мы исходим из простого наблюдения: случайность происходит мгновенно, но оставляет материальное изменение — след. След нельзя отменить. Следы накапливаются. Накопленный след становится памятью. Память делает следующую случайность зависимой от всей предыстории. Так из мига рождается история, из истории — структура.

1.1. Что такое случайность?

В обыденной речи мы называем случайностью непредсказуемое, неожиданное, то, что нарушает наши планы. У случайности есть свойство самопроизвольности —

способности возникать без видимой причины. Самопроизвольность делает случайность принципиально непредсказуемой: даже обладая полной информацией о системе, мы не можем сказать, когда именно произойдёт то или иное событие.

Мы привыкли доверять порядку. Законы физики кажутся незыблемыми, траектории планет — предсказуемыми, течение времени — равномерным. Но стоит заглянуть в микромир или вглядеться в далёкое прошлое Вселенной, и эта уверенность тает. В основе всего сущего — непрерывное движение случайностей. Для физики случайность — фундаментальное свойство материи.

Современная физика утверждает: пустота вакуума — кипящий океан виртуальных частиц, где непрерывно происходят флуктуации энергии, поля, плотности. Принцип неопределённости Гейзенберга [1] не оставляет лазейки для абсолютного покоя: чем точнее мы знаем энергию, тем больше неопределённость времени её существования. Эти первичные флуктуации — вечный двигатель всех последующих изменений.

Но что именно мы называем случайностью? Один ли это феномен — или за одним словом скрываются два разных явления? Чтобы ответить, нужно вернуться к истокам.

1.2. Тюхэ и автоматон

Античная философия различала два типа случайности. Аристотель в «Физике» и «Метафизике» выделяет четыре причины: материальную, формальную, действующую и целевую. Рядом с ними он помещает случай (τύχη, тюхэ) — для целенаправленных действий, и самопроизвольность (αὐτόματον, автоматон) — для процессов природы.

У Аристотеля тюхэ — пересечение причинных цепей, каждая из которых имеет своё основание, но их встреча не имеет общей причины. Корабль причаливает к берегу, где человек случайно находит своего должника. Причаливание корабля имеет причину. Нахождение должника на этом берегу — тоже. Их встреча — тюхэ. Свести к одной причине нельзя.

Автоматон — самопроизвольность в природе, событие, возникающее без цели и замысла. Порыв ветра срывает шляпу — это автоматон. Лошадь случайно наступила на камень и сломала ногу. Камень лежал здесь по одной причине, лошадь шла по другой. Их встреча — автоматон. Аристотель прямо говорит: автоматон шире тюхэ, потому что тюхэ относится к действиям существ, обладающих способностью выбора, а автоматон — к любым процессам.

Демокрит шёл иначе. Он разделял «тюхэ» толпы и философское понимание случайности. Для толпы случайность — то, что происходит без причины. Для Демокрита случайность — совпадение причинных цепей, каждая из которых детерминирована движением атомов, но их пересечение не имеет единой причины. Это — «случайность без вероятности», как позже скажет Чайковский [42].

Античная случайность — онтологическое событие, встреча причинных цепей, не сводимая к одной причине. Это понимание ближе к современному представлению о процессе с памятью, чем к классической теории вероятностей. Но что произошло с этим различением дальше?

1.3. Утрата различения

В римский период «фортуна» (латинский перевод тюхэ) стала означать просто удачу или неудачу. В средние века — Божий промысел. Исторически получилось так, что тонкое различение — тюхэ как пересечение причин и автоматон как самопроизвольность природы — было утеряно. Утеряно именно различение, а не сам феномен.

Наука Нового времени унаследовала и абсолютизировала линию тюхэ — случайность как измеримую вероятность и пересечение причинных цепей. Автоматон как самопроизвольность природы не был концептуально выделен: квантовая физика открыла

его заново, но описала тем же языком теории вероятностей, не восстановив античное различение.

Алгоритмическая теория информации, квантовая физика и теория хаоса — три независимые исследовательские традиции, не сговариваясь, пришли к одному выводу: классическая теория вероятностей описывает не случайность как таковую, а лишь её простейшую, модельную часть. Андрей Колмогоров, создатель аксиоматики теории вероятностей (1933), в 1965 году предложил алгоритмическое определение: случайность — это несжимаемость, невозможность описать объект короче, чем он сам [44]. Всё это — про индивидуальные математические объекты и строки символов. Нет материальности, нет истории, нет иерархии. Это тюхэ в чистом виде — моделируемая, вычислимая случайность, доведённая до предела.

Юрий Чайковский, историк науки, пришёл к случайности через биологию. Он обнаружил: распределение видов в природе не подчиняется нормальному — вместо него гиперболы, «тяжёлые хвосты», бесконечные дисперсии [42]. Классическая теория вероятностей здесь не работает. Чайковский назвал это «случайностью без вероятности» и предложил новую дисциплину — алеатику. Лев Шелепин показал математически: гиперболические распределения, которые Чайковский нашёл эмпирически, напрямую вытекают из немарковских равновесных распределений [40, 41]. Марковский процесс (без памяти) даёт нормальное распределение. Немарковский (с памятью) — гиперболическое. Память ломает классическую статистику.

Три подхода — алгоритмический, биологический, математический — сходятся: классическая вероятность описывает лишь половину случайности — тюхэ. Вторая половина — автоматон, самопроизвольность, процесс с памятью — осталась вне науки. Не хватило одного — понятия следа как материального результата случайности и понятия накопления следов.

Эта книга строит недостающую половину. Если теория вероятностей создала для тюхэ статистику — способ усреднить случайность и получить предсказуемое среднее, — то здесь строится способ отследить, как материальные следы накапливаются, связываются и порождают структуру. Не новый расчёт — новый способ видеть.

В парадигме потока случайностей (ППС) тюхэ и автоматон — исторические, а не онтологические категории. Автоматон — первичная категория внутри потока: начиная с уровня частиц у неё есть всё — самопроизвольность, материальность, локальность, память, разнообразие. Тюхэ — её предельный случай, когда следами можно пренебречь. Не две разные случайности, а одна на разных стадиях полноты.

1.4. Парадокс масштаба

Если случайность так фундаментальна, почему её так трудно поймать? Тут возникает парадокс масштаба. Мало случайностей — и мы их не видим: события слишком редки, чтобы набрать статистику. Много — и они растворяются в общем фоне: слишком много, чтобы различить отдельное событие. Ни туда, ни сюда.

Этот парадокс — не свойство нашего восприятия. Это свойство самого процесса: на малых масштабах события теряются в шуме, на больших — растворяются в огромности. Чтобы увидеть случайность целиком, нужно перестать смотреть на неё как на набор изолированных событий и начать смотреть как на процесс накопления материальных изменений — от квантовых флуктуаций до макроскопических катастроф.

Понимание природы случайности — ключ ко всей парадигме потока случайностей [33]. Из неё вырастает всё остальное. Но, прежде чем говорить о процессе, нужно понять, что такое отдельная случайность — капля, из которой потом сложится всё. Этому посвящена следующая часть.

2. ПРИРОДА СЛУЧАЙНОСТИ

В этой части мы будем неоднократно обращаться к одному примеру — росту трещины в листе оконного стекла. Через него можно проследить все понятия ППС — от квантовой флуктуации до макроскопического разрушения.

2.1. Определение случайности

Случайность — это материально обусловленный контакт, в котором одна структура оставляет след в другой.

Первичный контакт происходит на квантовом уровне вакуума. Он микроскопичный, самопроизвольный и материальный. И он оставляет след. Это исток, из которого вырастает поток случайностей. Но сам он не входит в поток: вакуумная флуктуация — не автоматон. Автоматон начинается на следующем уровне — с частиц и их взаимодействий [33]. Возникновение случайности не имеет цели — оно просто следует из квантовой природы материи.

Случайность всегда реализуется в конкретном состоянии объекта, а это состояние — результат всей истории накопленных изменений. Две одинаковые флуктуации, возникающие в двух разных состояниях одного и того же объекта, дают разные последствия. Сама случайность самопроизвольна — контекст, в котором она происходит, состояние объекта — разное.

В науке нет отдельной теории случайности. Теория вероятностей изучает события — то, что может произойти или не произойти. Случайность для неё — свойство события, а не объект исследования. Теория хаоса изучает детерминированную непредсказуемость: система подчиняется строгим правилам, но чувствительна к начальным условиям, и долгосрочный прогноз теряет точность. Детерминированный хаос не содержит случайности: при одинаковых начальных условиях система воспроизводит ту же траекторию.

Наука чётко разделяет эти два источника непредсказуемости. Хаос — эпистемологический: мы не можем предсказать, потому что не знаем начальные условия с достаточной точностью. Квантовая случайность — онтологическая: даже при идеальном знании состояния результат принципиально вероятностен. Реальность ещё не решила, где проявится эта случайность.

Этот спор имеет давнюю историю. Эйнштейн не верил, что квантовая случайность окончательна: «Бог не играет в кости». Он полагал, что за флуктуацией скрыты переменные, которые мы просто не видим. Бор отвечал: нет, квантовая случайность онтологическая — скрытого механизма нет. Теорема Белла (1964) и эксперименты Аспекта (1982), Клаузера и Цайлингера (Нобелевская премия 2022) показали: локальные скрытые переменные исключены [49, 50]. Нет никакого скрытого механизма, который при известности делал бы квантовое событие предсказуемым.

Но ППС не закрывает этот вопрос окончательно. Иерархия уровней бесконечна, и квантовый уровень — лишь номинальный ноль. Что находится ниже — за пределами нашего рассмотрения. ППС не утверждает, что скрытой причины нет, и не утверждает, что она есть. ППС считает этот уровень исходно бесконечно разнообразным и самопроизвольным. Иерархия причин в ППС начинается со следующего уровня — частицы и их составляющие.

Важно отличать случайность от события. Случайность — миг, начало, неопределимый момент. Событие — процесс, имеющий протяжённость и наблюдаемый результат. Когда прогнившее дерево падает, случайность — это тот неуловимый миг,

когда последняя флуктуация сдвинула атом в критической точке. Событие — это сам процесс падения, который мы наблюдаем.

Пример: трещина в стекле. Случайность — это мгновение, когда квантовая флуктуация в решётке стекла смещает атом из равновесного положения. Событие — это рост трещины от микроскопической до макроскопической, который длится секунды, минуты или годы.

2.2. Источник случайностей

Откуда берётся случайность? Квантовые флуктуации вакуума — первичный источник всех материальных случайностей. Принцип неопределённости Гейзенберга [1]:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2 \qquad (1)$$

задаёт фундаментальный предел, ниже которого случайность не может быть устранена.

Экспериментальные подтверждения реальности первичных случайностей:

• Лэмбовский сдвиг [5] — смещение энергетических уровней атома водорода под влиянием флуктуаций вакуума.

• Эффект Казимира [5] — притяжение незаряженных пластин за счёт флуктуаций вакуума.

• Теоретическое предсказание: излучение Хокинга [14] — рождение частиц у горизонта событий чёрной дыры. Прямых наблюдений нет; это теоретическое предсказание, согласующееся с ППС: виртуальные флуктуации вакуума превращаются в реальные частицы в сильном гравитационном поле.

Случайность произошла. Что она оставляет после себя?

Пример: трещина в стекле. Квантовые флуктуации в экстремальных условиях — в недрах звёзд, у горизонтов чёрных дыр, в ранней Вселенной — рождают реальные частицы. Эти частицы распространяются в пространстве. Достигая вещества, они выбивают атомы из структур. Так квантовая случайность оставляет след в материале. В стекле такой след — вакансия, дислокация, смещённый атом. Это и есть первичная случайность, из которой вырастает наша трещина.

2.3. След: материальность, локальность, масштаб

Случайность всегда имеет материальный носитель: флуктуацию поля, дефект структуры, возбуждение частицы. Не существует «чистых» случайностей без материальной основы. Флуктуация вакуума — кратковременное изменение состояния поля. Вакансия в кристалле — отсутствие атома, имеющее материальные последствия (напряжение в решётке).

След — материальный результат контакта, вызванного случайностью. Конкретное изменение в носителе. Случайность произошла. Она оставила отпечаток. Этот отпечаток существует. Его можно зафиксировать. Его можно измерить. Его нельзя отменить.

След имеет индивидуальность. Две случайности оставляют два разных следа. Они не смешиваются. Каждый след можно проследить до своей случайности. Каждый отпечаток в накопленных следах сохраняет свою историю.

След необратим. Факт изменения нельзя отменить. Можно изменить состояние так, что след станет невидимым. Но факт остаётся. Система прошла через это. Это записано в её материале.

Следы накапливаются. Каждый новый след ложится на предыдущие. Он не заменяет их. Он добавляется. Система — сумма всех следов, которые она получила.

Мы не видим квантовую флуктуацию. Но мы видим вакансию — её след. Мы не видим миг, когда атом сместился. Но мы видим дислокацию — её след. Мы не видим

накопление напряжения в решётке. Но мы слышим щелчок акустической эмиссии — след микротрещины.

Автоматон — самопроизвольность природы — невидим в момент события. Но он неизбежно оставляет след. След — единственный способ регистрации автоматона. Не прямой, не мгновенный — но единственный. Без следа автоматон ненаблюдаем. Со следом — наблюдаем, измеряем, прогнозируем.

Но не каждый след оставлен автоматоном: вакуумная флуктуация — исток — тоже оставляет след, но она не входит в поток. Автоматон начинается с уровня частиц, где следы становятся носителями памяти.

Когда мы говорим о следе, мы уже говорим о накоплении. Следы накапливаются на одном уровне: вакансии в решётке, аварии на шоссе. Накопление всегда идёт в пределах одного масштаба. Когда число следов на уровне превышает критическое значение, рождается качественно новый след — на следующем уровне. Вакансий стало достаточно — возникает дислокация. Аварий стало достаточно — дорога закрыта. Накопление горизонтально. Переход на новый уровень — это рост качества, а не продолжение накопления.

След растёт пропорционально масштабу и размерности носителя. Вакансия в кристалле — нульмерный след, точка в решётке, объём $\sim 10^{-27}$ м^3. Дислокация — линейный след, одномерный объект в решётке. Микротрещина — двумерный след, поверхность разрушения. Вмятина на автомобиле после столкновения — трёхмерный след, объём ~ 1 м^3. Масштаб разный на 27 порядков. Механизм возникновения следа при этом разный: вакансии накапливаются в решётке и при превышении порога рождают дислокацию; вмятина от столкновения — прямой контакт на макроуровне. Но в обоих случаях след — объект, размер которого определяется масштабом носителя, в котором он возник.

Материальный носитель следов — носитель памяти о случайностях. Каждая случайность, реализуясь в материальной структуре, оставляет в ней след. След становится частью состояния объекта и определяет, как будут реализоваться следующие случайности. Вакансия, возникшая в кристалле, деформирует решётку вокруг себя. Следующая флуктуация произойдёт уже в этой деформированной решётке, а не в идеальной. Носитель несёт всю цепочку прошлых изменений, отпечатавшихся в структуре [33].

Каждая случайность возникает в конкретной точке пространства-времени. Глобальные эффекты складываются из множества локальных событий. Локальность — фундаментальное свойство, вытекающее из релятивистской причинности. Даже взрыв сверхновой начинается с флуктуации в малом объёме ядра звезды.

Локальность означает конкретное состояние объекта в этой точке. А состояние объекта зависит от всей его истории. Та же флуктуация в состарившемся стекле даёт другой эффект — стекло другое. Флуктуация, которая в молодом кристалле вызовет небольшое смещение, в состарившемся кристалле с накопленными дефектами может запустить цепное разрушение. Случайность локальна и в пространстве, и в истории: она всегда реализуется в конкретном «сейчас», которое несёт в себе всё «до этого» [33].

2.4. Память: след как механизм

Накопленные следы — это память. Это материальное состояние носителя, в котором произойдёт следующая случайность. Поэтому последовательность случайностей — процесс с памятью: будущее зависит от всей истории накопленных следов.

В идеальном, математическом марковском процессе каждый шаг зависит только от текущего состояния, а история забывается [20]. Бросок кубика не зависит от того, что выпало раньше. Реальная случайность работает иначе: след сохраняется, и тогда последовательность случайностей — немарковский процесс с памятью [21, 22, 33].

Шелепин показал математически: марковский процесс даёт нормальное (гауссово) распределение, а немарковский — гиперболическое (с «тяжёлыми хвостами» и бесконечной дисперсией) [40, 41]. Гиперболические распределения эмпирически обнаружены в биологии (распределение видов по численности), социологии (города по населению), лингвистике (слова по частоте) — везде, где система имеет память. Закон Гутенберга–Рихтера для землетрясений [11] — тоже гиперболическое распределение. Память ломает классическую статистику — математическое подтверждение немарковости реальной последовательности случайностей.

След нарушает эргодичность — но не всегда и не сразу. Нарушение возникает, когда время релаксации системы превышает время наблюдения или когда система застревает в метастабильных состояниях. Это переход, а не бинарное свойство. В эргодической системе временное среднее равно ансамблевому: одну длинную траекторию можно заменить набором копий. Распределения достаточны — не нужна история конкретной системы. Но система, накапливающая следы, — неэргодична. Временное среднее растёт как $\sqrt{t}$, ансамблевое остаётся постоянным. Траектория и ансамбль дают разные результаты. Это доказано для случайного блуждания, аномальной диффузии, передачи электрона в растворителе (где ансамбль описывается экспонентой, а одиночная траектория — степенной релаксацией), биологических систем. Поэтому нельзя заменить историю конкретной системы статистикой копий. Нужна не вероятность, а траектория накопления следов. Это — фундаментальное отличие ППС от классической статистической механики: вместо распределений — траектории, вместо ансамблей — конкретные системы с историей.

Математическое выражение памяти — обобщённое уравнение Ланжевена, или уравнение Мори–Цванцига, выведенное в работах Р. Цванцига [27], Х. Мори [28] и С. Накадзимы [29]:

$$dX/dt = F(X(t)) + \int_0^t K(t-s) \bullet X(s)\, ds + \xi(t) \qquad (2)$$

где:

• $F(X(t))$ — детерминированная сила, действующая в текущий момент;

• $K(t-s)$ — ядро памяти. Если $K \neq 0$, процесс немарковский: состояние системы в момент t зависит от всей её предыстории s. Это ядро — математическое воплощение памяти как накопленного следа;

• $\xi(t)$ — стохастическая сила (шум), представляющая влияние неучтённых степеней свободы;

• интеграл $\int_0^t \ldots ds$ — сумма всех прошлых воздействий, взвешенных ядром K.

При $K = 0$ уравнение (2) сводится к обычному уравнению Ланжевена [27] — это и есть марковский предел. В реальной последовательности случайностей $K \neq 0$ — потому что каждая случайность оставляет материальный след [33]. Марковский процесс [20] — предельный случай, когда памятью можно пренебречь. Ядро памяти $K(t-s)$ — материальная связь прошлого с настоящим, математическое описание накопленных следов.

Пример: трещина в стекле. Каждый следующий дефект возникает в решётке, уже изменённой предыдущими. Если бы случайности были независимыми (марковскими), стекло старело бы равномерно и предсказуемо. Стекло стареет неравномерно — трещины растут кластерами, всплесками. Это эмпирическое проявление памяти. Ядро памяти $K \neq 0$: рост трещины зависит от всей предыстории накопления дефектов, а не только от текущего напряжения.

2.5. Разнообразие и энтропия

До сих пор примеры следов были разрушительными: трещина в стекле, вакансия в решётке, вмятина от удара. Но след — это не только разрушение. След — это любое

зафиксированное изменение на носителе. Атом поглотил нейтрон — появился изотоп, которого в этом месте не было. Изотоп — след. Два атома соединились в молекулу, которой раньше не существовало. Молекула — след. Новый минерал выпал из пересыщенного раствора или расплава. Кристалл — след. Каждое из этих изменений — зафиксированный результат случайности. Каждое — материально. Каждое — необратимо.

И здесь проявляется различие, которое до сих пор было скрыто. Разрушение и созидание — оба оставляют следы. Но ведут в разные стороны. Трещина в стекле увеличивает беспорядок. Новая молекула увеличивает богатство форм. Это разные процессы, и они требуют разных мер. Беспорядок измеряется энтропией. Богатство форм — разнообразием. Эти меры часто путают. Они описывают разные стороны одного и того же потока случайностей.

Энтропия — мера неупорядоченности, равномерности распределения [3].

Разнообразие — мера количества различных типов, вариантов, конфигураций.

Газ в сосуде имеет высокую энтропию, но низкое разнообразие (все молекулы одинаковы). Коллекция минералов имеет низкую энтропию (каждый кристалл упорядочен), но высокое разнообразие.

Разнообразие можно измерить. На каждом уровне иерархии можно выделить M типов следов. p_i — относительная частота *i*-го типа (доля следов этого типа от общего числа). Σ — сумма по всем M типам (i от 1 до M). Параметр D — эффективное число различных типов следов на данном уровне иерархии. Вычисляется через обратный индекс Симпсона:

$$D = 1 / \Sigma p_i^2 \qquad (3)$$

где суммирование ведётся по всем M типам следов на уровне n $(i = 1...M)$, а p_i — относительная частота i-го типа.

Нормализованная форма (индекс Джини–Симпсона):

$$\delta = 1 - \Sigma p_i^2 = 1 - 1/D \qquad (4)$$

Параметр δ принимает значения от 0 до 1.

Смысл формулы прост. Σp_i^2 — это вероятность того, что два случайно выбранных следа окажутся одного типа. Если все следы одинаковые — эта вероятность равна 1. Если все разные — минимальна. Обратная величина даёт эффективное число типов: сколько разных типов следов реально представлено в системе. Единица минус эта вероятность — доля случаев, когда два следа разные. Чем больше разных пар — тем выше δ.

Возможны три ситуации:

• $D = 1$ $(\delta = 0)$ — один тип следа. Нулевое разнообразие. Каждая случайность оставляет одинаковый след — один и тот же миг, повторяющийся снова и снова. Из него можно построить только повторение, новых нет.

• $D = M$ $(\delta = 1 - 1/M)$ — все M типов равновероятны. M конечно. Максимальное разнообразие для данного числа типов. Каждый тип повторяется достаточно часто, чтобы накопиться до порога. Богатейший строительный материал — каждая случайность приносит что-то новое.

• $D \to \infty$ $(\delta \to 1)$ — число типов не имеет верхней границы. Бесконечность в двух направлениях: M конечно, но неизвестно — число типов растёт без известного предела (численное направление); $M = \infty$ — математический предел (предельное направление).

В обоих случаях ни один тип не повторяется достаточно часто, чтобы накопиться до порога. Разнообразие растёт, а строительный материал иссякает.

Параметр D — мера строительного материала. Он определяет, что может быть построено из следов.

Энтропия измеряет диссипацию: то, что рассеивается, вырождается, теряется. В неравновесных системах с памятью энтропия — глобальная макроскопическая характеристика [37]. Она не различает два качественно разных сценария — диссипацию и

самоорганизацию [38]. В живых системах энтропия может оставаться неизменной при радикальной смене состояния.

Цаллис (1988) обобщил энтропию Больцмана–Гиббса параметром q [46]. При $q = 1$ она сводится к классической. Отклонение q от единицы возникает из немарковской эволюции, дальнодействующих сил или сложной внутренней структуры. Распределения Цаллиса — степенные (гиперболические), как у Шелепина. Классическая статистика Больцмана–Гиббса — частный случай при $q = 1$, то есть, когда памятью можно пренебречь. Три независимых результата — уравнение Мори–Цванцига ($K = 0$), статистика Цаллиса ($q = 1$) и гиперболические распределения Шелепина (марковский → нормальный) — сходятся: классическая теория вероятностей работает только там, где следами можно пренебречь.

Разнообразие D показывает, насколько богат набор доступных типов, — в отличие от энтропии, которая измеряет потери. D локально, зависит от уровня иерархии и связано с памятью: с ростом кластеризации и памяти разнообразие D падает, потому что материальный носитель каждого следующего уровня допускает меньше типов следов.

В реальной последовательности случайностей нет чистой марковской случайности без памяти — она вся структурирована предшествующими следами. Энтропия измеряет диссипацию в результате, D измеряет потенциал в процессе. Главным параметром служит разнообразие D.

Пример: трещина в стекле. В решётке стекла есть не один тип дефекта, а несколько: вакансии (отсутствие атома), дислокации (смещение атома), границы зёрен, микропузырьки. Если бы все дефекты были одного типа ($D = 1$), трещина росла бы только одним способом и разрушение шло бы равномерно. Типов много — $D \approx 3–5$ — и каждый тип дефекта влияет на рост трещины по-своему. Это богатство материала позволяет трещине найти «слабое звено» и распространяться. Если бы типов было бесконечно много ($D \to \infty$), ни один не повторялся бы достаточно часто, чтобы накопиться до порога — и трещина не успела бы вырасти.

2.6. Пять свойств случайности

Случайность — первичная категория ППС. Её свойства невозможно наблюдать напрямую: они проявляются только через материальный след. След — результат случайности. Пять свойств случайности определяют, какой след она оставляет и каким образом этот след может накапливаться.

Случайность в потоке — начиная с уровня частиц — характеризуется пятью фундаментальными свойствами. Вакуумная флуктуация — исток потока — обладает только первыми тремя: самопроизвольностью, материальностью, локальностью. Память и разнообразие появляются на следующих уровнях, где следы накапливаются и связывают случайности [33]:

1. **Самопроизвольность** — возникновение без внешней причины, из квантовой природы материи. Случайность принципиально непредсказуема. След — зафиксированное доказательство того, что она возникла: без следа самопроизвольность ненаблюдаема. Физическая основа — принцип неопределённости Гейзенберга (1).

2. **Материальность** — случайность всегда имеет носитель: флуктуацию поля, дефект решётки, возбуждение частицы. Не бывает случайности без материальной основы. След — изменение этого носителя. Носитель случайности одновременно носитель следа.

3. **Локальность** — каждая случайность возникает в конкретной точке пространства-времени. След — в той же точке. Локальность вытекает из релятивистской причинности: след не может опережать случайность и не может возникнуть в другом месте.

4. **Память (немарковость)** — каждая следующая случайность зависит от предыдущих. Следы прошлых случайностей — материальная причина этой зависимости: носитель удерживает их и изменяет условия для следующей случайности. Последовательность случайностей — немарковский процесс с памятью [21, 22], где будущее зависит от всей предыстории, а не только от текущего состояния. Марковский процесс [20] — предельный случай, когда памятью можно пренебречь. Математическое выражение — уравнение Мори–Цванцига (2).

5. **Разнообразие** — случайность порождает разные типы следов на данном уровне иерархии. Следы этих разных типов — строительный материал, из которого могут строиться новые формы. Измеряется параметром D (3), нормализованная форма δ (4). Разнообразие подчиняется закону необходимого разнообразия Эшби [32]: разнообразие целого должно быть не меньше разнообразия случайностей, которые поток обрушивает на него.

Все свойства зависимы, одно от другого. Память вытекает из материальности и локальности: материальный носитель в конкретной точке удерживает след. Разнообразие вытекает из самопроизвольности: если бы все флуктуации были одинаковыми, разнообразие равнялось бы единице и ничего нового не возникало. Квантовая природа [1] гарантирует более одного типа. Все пять свойств вместе задают полную характеристику случайности как первичной категории ППС [33].

Пример: трещина в стекле. Пять свойств на одном процессе. Самопроизвольность — флуктуация возникает без причины. Материальность — носитель, атомная решётка. Локальность — конкретный атом в конкретной точке стекла в конкретный момент. Память — каждый новый дефект возникает в решётке, уже изменённой предыдущими. Разнообразие — типов дефектов больше одного, и это определяет, как может расти трещина.

2.7. Накопление и старение

Случайность — миг. Она возникает и исчезает, а след остаётся. Пять свойств определяют, какой след оставляет каждая случайность. Следы накапливаются: каждый новый ложится на предыдущие и изменяет носитель. Накопление необратимо — след не исчезает, носитель не возвращается к прежнему состоянию.

Для всего во Вселенной накопление следов — старение. Звезда выгорает, кристалл накапливает дефекты, стекло трескается. Это прямое следствие материальности: каждая случайность оставляет след, каждый след изменяет носитель, и ни один след не исчезает.

Следы блокируются в месте появления. Целое удерживает их своей внутренней структурой, поглощая и не давая разрушить носитель сразу. Накопление следов постепенно разрушает способность к блокированию. Старение — медленное исчерпание ресурса блокирования.

Накопление следов, ведущее к разрушению, одновременно создаёт материал для рождения нового. Как именно из накопления рождается новое — об этом следующая часть.

3. ПОТОК СЛУЧАЙНОСТЕЙ

Представьте себе бесконечную реку. Она течёт снизу вверх, от микроскопических глубин к космическим просторам. В ней нет неподвижных участков: даже в самых тихих заводях вода медленно, но неуклонно обновляется. Эту реку нельзя увидеть глазами, но можно измерить приборами и описать языком математики. Это поток случайностей —

вечное движение материальных изменений, пронизывающее Вселенную от квантового уровня до галактических скоплений [33].

В предыдущей части мы говорили о рождении случайности — о том неуловимом мгновении, когда квантовая флуктуация вакуума даёт начало чему-то новому. Случайности не живут изолированно. Подобно каплям дождя, падающим в реку, они сливаются в единое целое, сталкиваются, накапливаются, порождают новые случайности. То, что начинается как едва заметное дрожание в пустоте, способно через миллиарды лет обернуться рождением звезды или гибелью галактики.

Поднимаясь сквозь уровни мироздания, поток случайностей раскрывает свою двойственную природу. В нём всегда различимы два пути. Один путь ведёт к разрушению. Флуктуации накапливаются, дефекты объединяются, трещины растут. Кристалл, долгие годы казавшийся незыблемым, внезапно рассыпается в пыль. Звезда, миллиарды лет сжигавшая водород, исчерпывает топливо и взрывается сверхновой. Это путь старения и катастрофы.

Поток несёт и жизнь. В турбулентной плазме случайно сближаются частицы — и рождается атом. В газопылевом облаке флуктуация плотности создаёт гравитационный центр — и начинает формироваться новая звезда. Это путь созидания и усложнения.

Одна и та же флуктуация может пойти любым из этих путей. Что именно произойдёт — зависит от бесчисленного множества обстоятельств, от случайного стечения случайностей. Поток безразличен к судьбе отдельных целых — он просто течёт, и в этом течении миры рождаются и гибнут, чтобы когда-нибудь родиться вновь.

Источник этой реки — квантовый вакуум. Вакуум, сам не будучи потоком — вечный родник, из которого поток берёт начало. У вакуума свои условия: флуктуации самопроизвольны, независимы, памяти нет — марковский предел, достижимый именно потому, что здесь след ещё не накоплен. Типов флуктуаций много, но они не связаны между собой. Вакуум неисчерпаем: он был всегда и будет всегда. Тот же принцип Гейзенберга [1] гарантирует: абсолютный покой невозможен. Это — исток, а не течение.

Поток начинается от этого вечного родника и поднимается снизу вверх, подчиняясь строгой иерархии. Случайности с нижних уровней влияют на верхние. Но это не просто «влияние» — каждый уровень рождает свой тип случайности со своим носителем и следом.

Квантовые флуктуации порождают столкновения, рождения и распады частиц. Частицы порождают ионизацию и возбуждение атомов. Атомы порождают разрыв и образование молекулярных связей. Молекулы порождают дефекты кристаллической решётки. И так до гравитационных взаимодействий галактик. Каждый уровень — новый носитель, новый тип следа, новое характерное время. Лестница не просто передаёт влияние снизу вверх — она создаёт новые формы случайности на каждом шаге. Обратное влияние возможно лишь через катастрофы: когда звезда взрывается, её вещество возвращается в межзвёздную среду и снова становится материалом для новых флуктуаций. Это создаёт асимметрию, стрелу времени: прошлое определяет будущее, но не наоборот [33, 35].

У потока есть и верхняя граница. За пределами метагалактик, на уровнях, где объём растёт быстрее, чем число событий может заполнить его, плотность случайностей падает ниже порога накопления. Целые перестают рождаться — событий слишком мало, чтобы достичь критической плотности. Поток растворяется, переходя из счётного, измеримого в несчётное, потенциальное. Эта верхняя граница зеркальна нижней: внизу целые не рождаются, потому что памяти ещё нет; вверху — потому что плотности уже недостаточно.

Между двумя границами — источником и несчётной зоной — существует поток. В пределах его существования главным параметром становится разнообразие D. Именно D

определяет, что может быть построено на каждом уровне. Поток живёт там, где D достаточно.

У потока, как и у любой реки, есть свои законы. Они вытекают из фундаментальных свойств материи. Эти законы образуют два слоя. Первый слой — законы равновесия — говорит, что сохраняется. Второй слой — законы потока — говорит, как это сохранение реализуется через уровни, материальность, пороги и совпадения. Один слой без другого не работает: равновесие без потока — мёртвый бассейн, поток без равновесия — вода, которая утекает в никуда.

3.1. Определение потока

Поток случайностей — это упорядоченная во времени последовательность случайностей, связанных через следы [33]. Каждая случайность в потоке — миг, начало события. Они не изолированы: след каждой предыдущей случайности становится частью состояния, в котором реализуется следующая. Так из дискретных мигов случайности складывается непрерывное течение.

Поток — система, в которой каждая следующая случайность застаёт систему уже изменённой. Связь между случайностями — структурная: они соединены через следы, которые несёт материальный носитель.

Поток имеет иерархическую структуру. Исток потока — квантовые флуктуации вакуума, не часть потока, а его вечный источник. Случайности первого уровня (столкновения, распады, квантовые переходы частиц) порождают события среднего уровня (дефекты структуры), которые, накапливаясь, порождают события верхнего уровня (макроскопические изменения). Каждый уровень имеет свой масштаб объёма V_n, своё число случайностей N_n и своё характерное время T_n.

Поток имеет границы. Нижняя — квантовый вакуум, вечный источник, не часть потока, а его исток. Верхняя — несчётная зона за пределами метагалактик, где плотность случайностей падает ниже порога накопления и поток растворяется. Между этими границами поток существует как физическая реальность, и в пределах его существования разнообразие D — главный параметр: D определяет границы созидания.

Таблица 1. Границы потока

	Нижняя граница	**Между границами**	**Верхняя граница**
Что	квантовый вакуум	поток	несчётная зона
Статус	исток, не часть потока	физическая реальность	растворение
Условие	вечный источник	D — главный параметр	плотность ниже порога накопления

Пример: трещина в стекле. Поток начинается с квантовой флуктуации в решётке. Каждая флуктуация — миг. Миги не изолированы: вакансия, возникшая в момент t_1, оставляет след — деформирует решётку. В момент t_2 следующая флуктуация реализуется в этой деформированной решётке. Так из дискретных мигов складывается непрерывный процесс накопления дефектов — поток.

3.2. Иерархия уровней

Поток проходит через иерархию уровней. Уровень n характеризуется:

- V_n — объём, в котором происходят случайности данного уровня.
- N_n — число случайностей уровня n в объёме V_n.
- T_n — характерное время накопления случайностей уровня n.

Мелкие случайности (низкие n) многочисленны и происходят в малых объёмах за короткое время. Крупные события (высокие n) редки, происходят в больших объёмах и требуют длительного накопления.

Иерархия — следствие кумулятивности: каждый верхний уровень рождается из накопления нижних. Уровни связаны, а не независимы.

Уровень 0 — квантовый вакуум. Источник, не часть потока. Предел в сторону уменьшения размерности, уходящий в бесконечность. Флуктуации самопроизвольны, независимы, памяти нет.

Уровень 1 — частицы. Первый уровень потока. Случайности — столкновения, распады, квантовые переходы. След — изменение состояния частицы.

Уровень 2 — атомы. Случайности — ионизация, возбуждение, рекомбинация. След — изменение электронной конфигурации.

Уровень 3 — молекулы. Случайности — разрыв и образование связей. След — изменение структуры молекулы.

Уровень 4 — кристаллы и конденсированное вещество. Случайности — дефекты решётки, дислокации, фазовые переходы. След — изменение структуры решётки.

Уровень 5 — макроскопические тела. Случайности — трещины, деформации, разрушения. След — макроскопическое изменение формы.

… и так до метагалактик. Верхний предел — несчётная зона, где плотность случайностей падает ниже порога.

Тип случайности меняется с уровнем, но материальность сохраняется (закон 3.4.3). Каждый уровень — свой носитель, свой след, своё характерное время. ППС строит иерархию от квантового вакуума до метагалактик как единый процесс накопления следов — то, чего не делает ни одна из существующих теорий.

Пример: трещина в стекле. Уровень 1–2: квантовая флуктуация в решётке ($V \sim 10^{-45}$ м^3, $T \sim 10^{-25}$ с). Уровень 5: вакансия или дислокация ($V \sim 10^{-27}$ м^3, $T \sim 10^{-6}$ с). Уровень 6–7: микротрещина, кластер дефектов ($V \sim 10^{-18}$ м^3, $T \sim 1$ с). Уровень 8: макроскопическая трещина ($V \sim 10^{-9}$ м^3, $T \sim 10^{2}$ с). От уровня 1 до уровня 8 — масштаб меняется на 36 порядков, время — на 27. Это один и тот же процесс.

3.3. Законы равновесия

Законы равновесия описывают баланс потока — то, что сохраняется при переходе между уровнями и при усреднении во времени.

3.3.1. Масштабирование числа случайностей

Число случайностей уровня n в объёме V_n представляет собой траекторную величину. Оно уникально для каждого объекта и определяется всей его предысторией. У каждого объекта своя траектория — та, которую он прошёл, и та, которую он проходит сейчас. Это онтологический факт, вытекающий из немарковости случайностей (§2.4).

Число случайностей уровня n в объёме V_n меняется со временем в соответствии с уравнением:

$$dN_n / dt = f_n (N_n, V_n, \int_0^t K_n(t-s) \cdot N_n(s)\, ds) \qquad (5)$$

где:

- $N_n(t)$ — число случайностей уровня n в объёме V_n в момент t;
- $V_n(t)$ — характерный объём уровня n в момент t;
- $K_n(t-s)$ — ядро памяти уровня n;
- f_n — функция, зависящая от конкретной физики уровня.

Смысл уравнения прост. Скорость изменения числа случайностей зависит от текущего состояния и от всей предыстории — через интеграл памяти. Каждая случайность

оставляет след. След накапливается. Накопленный след меняет условия для следующих случайностей. Так работает немарковость на уровне числа событий.

Уравнение (5) представляет собой частный случай обобщённого уравнения Ланжевена (уравнение Мори–Цванцига, формула 2 из §2.4):

$$dX/dt = F(X(t)) + \int_0^t K(t-s) \cdot X(s)\, ds + \xi(t)$$

где X — состояние системы, F — детерминированная сила, K — ядро памяти, ξ — стохастическая сила. Для числа случайностей роль X играет N_n, роль F — функция f_n, роль K — ядро памяти уровня.

Ядро $K_n(t-s)$ — математическое выражение памяти уровня. Оно описывает, как следы прошлых случайностей влияют на текущую скорость. Через ядро памяти прошлое входит в настоящее.

При отсутствии памяти ($K_n = 0$) уравнение принимает вид:

$$dN_n / dt = f_n (N_n, V_n) \qquad (6)$$

Это марковский предел. Он работает там, где следами можно пренебречь. Примеры: радиоактивный распад, тепловой шум, идеальный игральный кубик. В реальных системах — стекло, металл, биологическая ткань — $K_n \neq 0$. Следы накапливаются. Память меняет траекторию. Марковский предел представляет собой точку на шкале потока ($\psi = 0{,}5$, $H = 0{,}5$, см. §3.6.3). Немарковский процесс занимает всю остальную шкалу.

Число случайностей в конкретном образце меняется со временем по своей траектории. Оно зависит от всей предыстории этого образца: от того, как он был изготовлен, как охлаждён, как облучён, сколько времени существует. Два образца с одинаковым составом, но разной историей, дадут разные траектории. Это следствие немарковости. Каждый образец несёт в себе память о своём прошлом, и эта память определяет его будущее.

В данном образце стекла с данной историей (отжиг, облучение, возраст) число событий за сутки имеет своё значение. Оно уникально для этого образца. Оно меняется со временем, потому что стекло стареет — накопленные следы меняют условия для следующих событий. Так формируется траектория конкретного образца.

Физическая основа: уравнение непрерывности (гидродинамика, электродинамика, квантовая механика) [2, 3], закон сохранения энергии-импульса [1].

Фальсификация: уравнение (5) опровергается, если для конкретной системы измеренная траектория $N_n(t)$ окажется независимой от предыстории. То есть если два образца с разной историей, но одинаковым текущим состоянием, дадут одинаковую скорость изменения числа событий. Это означало бы, что память отсутствует ($K_n = 0$), и марковский предел работает.

Ни одного такого случая для систем с накопленными следами пока не обнаружено.

Пример: трещина в стекле. На уровне 5 (вакансии) в объёме $V_5 \sim 10^{-27}$ м^3 возникает $N_5 \sim 10^{18}$ вакансий за характерное время $T_5 \sim 10^{-6}$ с. Вес: $N_5 \cdot V_5 \sim 10^{-9}$. На уровне 8 (макроскопическая трещина) в объёме $V_8 \sim 10^{-9}$ м^3 возникает $N_8 \sim 1$ трещина за $T_8 \sim 10^2$ с. Вес: $\boldsymbol{N_8 \cdot V_8 \sim 10^{-9}}$. Тот же вес. Миллиарды вакансий за микросекунды — или одна трещина за минуты. Вес тот же — масштаб другой.

Ядро памяти $K_n(t-s)$ не определено для большинства физических систем. Его вычисление — задача дальнейшей работы. Ядро можно получить тремя путями: из микроскопической динамики (проекционная техника Мори), из экспериментальной траектории (через автокорреляцию или показатель Хёрста), из структуры носителя (через пространственную корреляцию дефектов).

3.3.2. Статистическая предсказуемость

При достаточно большом времени усреднения в марковском пределе закон масштабирования числа случайностей восстанавливается:

$$\langle N \rangle \cdot V = C \qquad (7)$$

где $\langle N \rangle$ — среднее число случайностей за время усреднения, C — константа.

Индивидуальные случайности непредсказуемы — момент каждой определяется квантовой самопроизвольностью (формула 1). Средние характеристики потока вычислимы с любой точностью при достаточно большом времени наблюдения. Это свойство самого потока: случайность индивидуальна, предсказуемость коллективна.

Но это работает только в марковском пределе. В реальных системах с памятью ($K_n \neq 0$) временное среднее не равно ансамблевому. Нельзя заменить историю конкретной системы статистикой копий. Поэтому статистическая предсказуемость — не универсальное свойство потока, а свойство его марковского предела.

Поток можно разложить на среднее и флуктуацию:

$$\langle J \rangle = f(r,t),\ J = \langle J \rangle + \delta J \qquad (8)$$

где $\langle J \rangle$ — среднее значение потока (предсказуемо), δJ — случайная флуктуация с известным распределением, $f(r,t)$ — детерминированная функция (решение уравнений типа диффузии, переноса). Угловые скобки $\langle\ \rangle$ обозначают усреднения — по времени, по ансамблю или пространственное.

Статистическая предсказуемость — не единственный уровень прогноза в ППС. Есть второй: прогноз состояний. Мы не предсказываем, когда произойдёт событие — индивидуальная случайность непредсказуема. Мы предсказываем, где носитель станет неустойчивым. Накопленные следы, рост напряжённого состояния, кластеризация — всё это измеримо и позволяет прогнозировать устойчивость носителя, а не исход события. Это структурный прогноз, а не вероятностный. Он опирается на уравнение Мори–Цванцига (2): зная ядро памяти $K(t-s)$, можно оценить, как накопленные следы определяют будущее состояние. Прогноз состояний, а не событий — это применение немарковской динамики для предсказания траектории конкретной системы.

Физическая основа: статистическая физика, теория вероятностей [3].

Фальсификация: статистические характеристики потока принципиально не могут быть предсказаны даже в среднем.

Пример: трещина в стекле. Мы не можем предсказать, в какой именно момент возникнет конкретная вакансия в решётке стекла — это индивидуальная случайность. Но в марковском пределе можно оценить среднюю скорость накопления дефектов. На втором уровне — мы предсказываем не момент возникновения конкретной трещины, а то, что в зоне с накопленными дефектами носитель станет неустойчивым. Это прогноз состояния, не события.

3.4. Законы потока

Законы равновесия говорят, что сохраняется. Законы потока говорят, как это сохранение реализуется через уровни, время и зоны. Законы потока не нарушают законы равновесия — они их раскрывают.

3.4.1. Масштабная инвариантность

Плотность случайностей падает с ростом масштаба — ровно настолько, насколько растёт объём:

$$N_{(n-1)}\ (в\ V_n) = K^2 \cdot N_n\ (в\ V_n) \qquad (9)$$

где K — коэффициент масштабирования объёма ($V_n = K \cdot V_{(n-1)}$).

Мелких событий много, крупных мало. Их соотношение строго подчиняется K^2 — поток самоподобен на всех уровнях. Это масштабная инвариантность [8]: структура потока повторяется при изменении масштаба. То, что мы видим на уровне квантовых флуктуаций — неравномерность, кластеризация, затишья и всплески — повторяется на уровне дефектов кристалла, на уровне землетрясений, на уровне социальных потрясений.

Физическая основа: причинность, иерархическая структура материи. Прямые подтверждения — закон Гутенберга–Рихтера для землетрясений [11] и модель песчаной кучи Пер Бака [7].

Фальсификация: устойчивый регулярный поток влияния сверху вниз, не связанный с разрушением целостных объектов [35].

Пример: трещина в стекле. Распределение размеров микротрещин в стекле подчиняется степенному закону — мелких трещин много, крупных мало. Это та же закономерность, что и закон Гутенберга–Рихтера для землетрясений: мелких толчков много, крупных мало. Структура потока повторяется при изменении масштаба на 36 порядков — от нанометровых дефектов до метровой трещины.

3.4.2. Направленность потока

Поток направлен от нижележащих уровней к вышележащим. Случайности уровня n влияют на уровень $n+1$, а обратное влияние возможно только через разрушение целых и возврат их материала в поток [35]:

$$J_{(n \to n+1)} > 0, \quad J_{(n+1 \to n)} = J_{кат} \qquad (10)$$

где $J_{кат}$ — поток, возникающий только при катастрофах, разрушающих целые уровня $n+1$.

Передаётся материя — и передаются ограничения, накопленные на нижних уровнях. Каждый следующий уровень «помнит» ограничения предыдущего: атом углерода «помнит», что построен из шести протонов и электронов; молекула «помнит» правила атома; кристалл «помнит» правила молекулы. Иерархическая передача — накопление памяти: чем выше уровень, тем больше у него ограничений, тем сильнее зависимость от предыстории. Это немарковская природа иерархии.

Физическая основа: принцип причинности, иерархия масштабов в физике.

Фальсификация: устойчивый регулярный поток влияния сверху вниз, не связанный с разрушением целостных объектов [35].

Пример: трещина в стекле. Квантовые флуктуации (уровень 1) порождают вакансии (уровень 5). Вакансии порождают микротрещины (уровень 6). Микротрещины порождают макроскопическую трещину (уровень 8). Поток идёт снизу вверх. Обратное влияние? Только если стекло разбить — осколки возвращаются в поток материала, из которого можно сделать новое стекло. Трещина не может «обратным влиянием» устранить квантовые флуктуации, её породившие.

3.4.3. Трансформация материальности

При переходе с уровня на уровень «вещество случайности» меняет форму, но сохраняет материальную природу:

$$M_{(n+1)} = O_n(M_n) \qquad (11)$$

где M_n — материальный носитель случайности на уровне n, O_n — оператор трансформации, сохраняющий материальность.

Квантовая флуктуация становится неоднородностью плотности, а та — зародышем галактики. Форма другая, носитель другой, материальность сохраняется. Поток не может стать «чистой информацией» без носителя. Этот закон гарантирует, что все остальные законы работают с материей, а не с абстракцией.

Физическая основа: законы сохранения, единство материи.

Фальсификация: случайность, которая при переходе на следующий уровень полностью теряет материальность (становится «чистой информацией» без носителя).

Пример: трещина в стекле. Носитель меняется: квантовая флуктуация (уровень 1) → вакансия в решётке (уровень 5) → микротрещина (уровень 6) → макроскопическая трещина (уровень 8). Форма другая, носитель другой — это всегда материальное изменение в реальном стекле. Нет ни одного шага, где случайность превращалась бы в «чистую информацию» без носителя.

3.4.4. Кумулятивность

Чтобы одно событие верхнего уровня произошло, система должна накопить критический вес случайностей нижнего уровня за характерное время:

$$T_n = K \bullet T_{(n-1)} \qquad (12)$$

где T_n — характерное время накопления случайностей уровня n, K — тот же коэффициент масштабирования из (9).

Множество мелких следов нижнего уровня собираются во времени, чтобы породить одно дискретное событие верхнего уровня. Это кумулятивность — двигатель масштабирования [33]. Следы накапливаются, и накопленное достигает порога, за которым рождается новое качество.

Соотношение (12) — эмпирическое масштабное соотношение, не выводимое из первых принципов. Подобно тому, как в турбулентности колмогоровский скейлинг [6] даёт $T \sim L^{(2/3)}$ для времени диссипации вихря размера L (размерный анализ, не вывод), формула (12) устанавливает, что время накопления растёт линейно с масштабным коэффициентом K.

Накопленный вес за время T:

$$W_n(T) = \langle N_n \rangle \bullet V_n \bullet T = C \bullet T \qquad (13)$$

Здесь $W_n(T)$ — накопленный вес за время T. Размерность $W_n(T)$ — [м^3•с]. За любой одинаковый промежуток времени суммарный накопленный вес одинаков на всех уровнях иерархии.

Итоговая формула, объединяющая количество, объём и время:

$$N_{(n-1)} \bullet V_{(n-1)} \bullet T_{(n-1)} \bullet K = N_n \bullet V_n \bullet T_n \qquad (14)$$

Вес, который на нижнем уровне распределён по множеству мелких следов за короткое время, на верхнем уровне собирается в одно крупное событие за долгое время. Вес тот же — время другое.

Физическая основа: кумулятивные процессы в физике твёрдого тела, теория самоорганизованной критичности [7].

Фальсификация: крупное событие самопроизвольно возникает без накопления малых (мгновенно, без характерного времени).

Кумулятивность подводит систему к порогу, за которым открываются два пути. Первый — интеграция. Разрозненные элементы потока соединяются связями, возникает граница, отделяющая новое целое от потока, и целое начинает противостоять потоку своей структурой. Второй — дезинтеграция. Существующее целое теряет связи между частями и распадается, возвращая материал в поток. Интеграция и дезинтеграция чередуются.

Это ключевое утверждение ППС: одна и та же кумулятивность, которая старит и убивает, одновременно рождает новое. Накопление следов — и путь к смерти старого целого, и путь к рождению нового. Старение (раздел 2.7) описывает смерть. Закон совпадений (16) описывает рождение. Оба — следствия одного процесса: накопления материальных следов. Это не две разные силы, а две стороны одной.

Пример: трещина в стекле. Миллиарды квантовых флуктуаций в решётке стекла накапливаются за годы, порождая тысячи вакансий и дислокаций. Тысячи дефектов накапливаются за месяцы, порождая микротрещины. И однажды — одна последняя флуктуация — рождает макроскопическую трещину, которую видно глазом. Кумулятивность — двигатель масштабирования от атома до трещины.

3.4.5. Критические зоны и пороговая активация

Чтобы из потока родилось нечто новое, нужна критическая концентрация следов — зона, где случайность временно становится порядком. Без таких критических зон невозможна никакая самоорганизация [34].

Пороговая активация: вероятность рождения нового целого отлична от нуля только при превышении локального порога:

$$P_{birth} = \Theta(\rho_{loc} - \rho_{crit}) \bullet \sigma \bullet J_{local} \qquad (15)$$

где Θ — функция Хэвисайда (0 при $\rho_{loc} < \rho_{crit}$, 1 при $\rho_{loc} \geq \rho_{crit}$), ρ_{loc} — локальная плотность следов в критической зоне, ρ_{crit} — критическая плотность (порог активации), σ — сечение захвата, J_{local} — локальная плотность потока подходящих элементов. P_{birth} здесь — не вероятность в строгом смысле, а относительная интенсивность (rate): произведение плотности, сечения и потока даёт скорость рождения новых целых в критической зоне.

Критическая зона — состояние потока, в котором накопление превысило порог. Зона возникает там, где следы кластеризуются, где материальный носитель удерживает память, и где достаточно времени для накопления (T_n из формулы 12).

Пороговая активация (15) — родственник точки бифуркации в теории хаоса [9, 12, 43]: вблизи бифуркации малая флуктуация определяет, по какой ветви пойдёт система. В ППС эта флуктуация онтологически случайна, а не просто неизвестна — и результат закрепляется материальным следом, а не стирается при следующем запуске.

Без критических зон поток остаётся потоком — следы идут, вес сохраняется, но ничего нового не рождается. Критическая зона — это фазовый переход: из накопления в целое.

Физическая основа: теория фазовых переходов, теория катастроф [9, 12], теория нуклеации.

Фальсификация: устойчивое рождение новых целых в среде, полностью лишённой локальных неоднородностей.

Пример: трещина в стекле. В локальной зоне стекла — скажем, у края старого дефекта — плотность накопленных вакансий ρ_{loc} растёт. Пока $\rho_{loc} < \rho_{crit}$, трещины нет. В момент, когда $\rho_{loc} \geq \rho_{crit}$, функция Хэвисайда переключается с 0 на 1. Критическая зона готова — но трещины ещё нет. Нужен третий фактор — энергия.

3.4.6. Закон совпадений

Для рождения нового целого должны одновременно сойтись три фактора:

1. Критическая зона — где накопленный вес достиг порога ρ_{crit} (следствие кумулятивности (12) и пороговой активации (15)).

2. Строительный материал — разнообразие следов D (формула 3, раздел 2.5), достаточное, чтобы из него можно было строить, и достаточная частота каждого типа, чтобы накопиться до порога. Однообразный поток ($D = 1$) даёт только повторение. Бесконечно разнообразный ($D \to \infty$) не даёт накопления. Нужен оптимум.

3. Энергия — способная соединить материал в зоне. Энергия — материальное взаимодействие: химическая связь, упругое напряжение, гравитационный коллапс. Энергия связи E_{bind} должна превышать пороговую E_{crit}.

Ни одно из этих условий по отдельности недостаточно [34]:

• Зона без материала — пустая критичность, порог достигнут, но строить не из чего.

• Материал без зоны — богатый набор, но не накопленный до порога.

• Зона и материал без энергии — накопленный богатый набор, но не соединённый.

$$P_{birth} \propto \rho_{loc} \cdot \sigma \cdot J_{local} \cdot D \cdot \Phi(E_{bind} - E_{crit}, \Delta r, \Delta t) \quad (16)$$

Здесь P_{birth} — вероятность (относительная интенсивность) рождения нового целого. Множитель D — разнообразие — отражает богатство строительного материала. Ф — функция совпадения (пространственно-временной и энергетический резонанс). В простейшем случае: $\Phi = 1$, если $E_{bind} \geq E_{crit}$, $|\Delta r| < \Delta r_{crit}$, $|\Delta t| < \Delta t_{crit}$, иначе 0.

Закон совпадений — вершина. Он не независим от предыдущих законов — он их результат. Масштабирование числа случайностей (5) гарантирует, что материал есть. Масштабная инвариантность (9) гарантирует, что он распределён по уровням. Кумулятивность (12) гарантирует, что он накоплен. Пороговая активация (15) гарантирует, что накопление достигло порога. Разнообразие D (3) гарантирует, что материал достаточно богат. Закон совпадений собирает все эти гарантии в одну точку — и говорит: здесь рождается новое.

Физическая основа: теория вероятностей, статистическая физика [3], теория нуклеации [9].

Фальсификация: рождение целого при полном отсутствии хотя бы одного из трёх факторов.

Пример: трещина в стекле. В критической зоне (уровень 7, $\rho_{loc} \geq \rho_{crit}$) сходятся три фактора: зона — плотность дефектов достигла порога; материал — $D \approx 3$–5 (вакансии, дислокации, границы зёрен, микропузырьки); энергия — упругое напряжение $E_{bind} \geq E_{crit}$, достаточное для разрыва химической связи Si–O. $\Phi = 1$ — пространственно-временной и энергетический резонанс состоялся. Рождается макроскопическая трещина.

3.5. Меры потока

Законы потока описывают его структуру. Чтобы сравнивать потоки — разные процессы, разные системы, разные уровни — нужны меры. Четыре меры потока измеряют четыре независимых свойства.

3.5.1. Параметр ψ — кластеризация

Показатель кластеризации ψ определяет, как следы распределены во времени. Измеряется через индекс дисперсии Фано [25]:

$$R = \sigma^2 / \mu \quad (17)$$

$$\psi = R / (1 + R) \quad (18)$$

Преобразование $\psi = R/(1+R)$ отображает индекс Фано $R \in [0, \infty)$ на интервал $\psi \in [0, 1)$. Выбор функции обусловлен тремя требованиями: монотонность, $\psi(0) = 0$, $\psi \to 1$ при $R \to \infty$. Точка $R = 1$ отображается на $\psi = 0{,}5$ — симметричный центр шкалы. Где σ^2 — дисперсия числа событий в интервале, μ — среднее число событий в интервале, R — индекс дисперсии Фано.

Три режима:

• $\psi \to 0$ — регулярный поток. События распределены почти равномерно, как удары метронома. Случайность подавлена.

• $\psi = 0{,}5$ — чисто случайный поток (пуассоновский). События независимы. Пример: радиоактивный распад, тепловой шум.

• $\psi \to 1$ — кластеризованный поток с памятью. События группируются: за всплеском активности следует затишье, за затишьем — новый всплеск. Пример: землетрясения [11], каскадное звёздообразование.

Ошибка измерения ψ для временного ряда длины N:

$$\Delta\psi = 1/(1+R)^2 \cdot \sqrt{(2/N)} \qquad (19)$$

Для идеально самоподобных (фрактальных) процессов выполняется приблизительное соотношение $\psi \approx H$ (см. раздел 3.5.2). Для реальных данных это соотношение может нарушаться: например, для землетрясений $\psi \approx 0{,}963$, а H лишь немногим выше 0,5. Это означает, что кластеризация и память — связанные, но не тождественные характеристики.

Пример: трещина в стекле. Щелчки акустической эмиссии — звук от микроразрывов связей в стекле — не идут равномерно. Они группируются: серия щелчков, потом тишина, потом снова серия. Для каталога акустической эмиссии стекла $\psi \approx 0{,}8$ — поток далёк от пуассоновского. Следы кластеризуются потому, что стекло «помнит» свою историю дефектов.

3.5.2. Параметр H — память

Показатель Хёрста H измеряет долговременную зависимость между следами [23, 24]. Вычисляется через R/S-анализ или метод DFA:

$$Hurst(n) = \log(R(n)/S(n)) / \log(n) \qquad (20)$$

Три режима:

• $H = 0{,}5$ — марковский предел: следы независимы, памятью можно пренебречь. Будущее не зависит от прошлого. Пример: радиоактивный распад.

• $H > 0{,}5$ — персистентность: следы связаны, будущее зависит от прошлого. Тренды имеют тенденцию сохраняться. Пример: афтершоки землетрясения.

• $H < 0{,}5$ — антиперсистентность: тенденция сменяется на противоположную.

Память потока — накопленный след в носителе (раздел 2.4). Каждая случайность меняет структуру, и следующая реализуется в изменённой структуре. H измеряет, насколько сильно это наследие влияет на будущее.

Пример: трещина в стекле. Для каталога акустической эмиссии $H \approx 0{,}7$. Это персистентность: если в последние минуты шла серия щелчков, вероятность новой серии в ближайшие минуты выше. Трещина «помнит» свой путь.

3.5.3. Параметр TE — направленность

Передаточная энтропия TE, введённая Т. Шрайбером [26], измеряет асимметрию влияния между двумя потоками:

$$TE(X \to Y) = \Sigma\, p(y(n+1), y_n, x_n) \cdot \log\left[p(y(n+1) \mid y_n, x_n) / p(y(n+1) \mid y_n)\right] \qquad (21)$$

Три режима:

• $TE = 0$ — потоки независимы. Знание прошлого X не помогает предсказать будущее Y.

• $TE(X \to Y) > 0$ — есть направленный поток. Знание прошлого X уменьшает неопределённость будущего *Y*.

• $TE(X \to Y) > TE(Y \to X)$ — поток *X* ведёт, поток *Y* следует.

В отличие от кросс-корреляции, TE улавливает нелинейные зависимости и направление связи. *TE* асимметрична: $TE(X \to Y)$ может быть больше нуля, а $TE(Y \to X)$ — равна нулю [26]. Это математическое выражение направленности.

Пример: трещина в стекле. Разделим каталог акустической эмиссии на два потока: X — микротрещины (уровень 6), Y — макротрещины (уровень 8). $TE(X \to Y) > 0$: знание прошлой активности микротрещин помогает предсказать рост макротрещины.

TE(Y→X) ≈ 0: знание прошлой макротрещины не помогает предсказать, где возникнет новая микротрещина. Влияние направлено снизу вверх.

3.5.4. Параметр D — разнообразие

Эффективное число различных типов следов на данном уровне иерархии (формулы 3 и 4 из раздела 2.5). Связь с законом Эшби [32]:

$$D_{целого} \geq D_{потока} \qquad (22)$$

Целое устойчиво, только если его внутреннее разнообразие блокирования случайностей не меньше разнообразия случайностей, которые поток обрушивает на него. Целое выдерживает поток, потому что следы не становятся фатальными, а блокируются в месте появления. При $D_{целого} < D_{потока}$ поток находит «слепую зону» — случайность, которой целое не может противостоять, и она разрушает его. Старение постепенно разрушает этот процесс блокирования: накопленные следы снижают $D_{целого}$, пока не открывается «слепая зона».

Пример: трещина в стекле. D ≈ 3–5 — в потоке дефектов стекла есть вакансии, дислокации, границы зёрен, микропузырьки. Если бы D = 1 (только вакансии), трещина росла бы одним способом. При D ≈ 4 трещина может найти «слабое звено» — границу зерна. Если бы D было слишком велико (D → ∞), ни один тип дефекта не повторялся бы достаточно часто, чтобы накопиться до порога.

3.5.5. Таблица 2. Четыре меры потока

Процесс	ψ	H	TE	D
Радиоактивный распад	0,505	0,5	0	низкое
Броуновское движение	0,5	0,5	0	низкое
Землетрясения [11]	0,963	> 0,5	> 0	высокое
Турбулентность [6]	→ 1	> 0,5	> 0	высокое
Рост трещины в стекле	~0,8	~0,7	> 0	~3–5

Четыре меры независимы: ψ измеряет распределение во времени, H — долговременную зависимость, TE — направленность влияния, D — богатство типов. Вместе они задают полный профиль потока — как отпечаток пальца.

3.5.6. Практические оценки

Для надёжной оценки параметров нужны ряды достаточной длины. Для ψ при $N = 1000$ погрешность $\Delta\psi \approx 0{,}03$ (формула 19). Для H ряд длиной менее 10^3 точек даёт оценку с систематическим смещением; $N \geq 10^4$ — приемлемо. Для TE требуется не менее 10^4 точек на каждый поток. Для D нужно не менее 10^2 событий на каждый тип.

Пример: трещина в стекле. Для измерения четырёх мер нужно записать акустическую эмиссию стекла при нагружении: не менее 10^4 щелчков за сеанс. Это даёт надёжные оценки ψ, H, TE и D — полный профиль потока дефектов.

3.5.7. ψ-градиент иерархии

Параметр ψ — функция уровня. На дне иерархии, в квантовом вакууме, флуктуации первичны и независимы: памяти ещё нет, $\psi \approx 0{,}5$, $H \approx 0{,}5$. Каждый переход «накопление → катастрофа → новый уровень» создаёт память — материальный след, который связывает случайности. ψ растёт. Одновременно накладываются ограничения: материальный носитель каждого следующего уровня допускает меньше типов следов. D падает.

Пирамида уровней одновременно гонит ψ вверх и D вниз — от случайности независимых флуктуаций к причинности связанных событий. Ни $\psi = 1$, ни $D = 1$ не достигаются: квантовая природа всегда даёт более одного типа, а каждый переход создаёт память, но не устраняет разнообразие полностью.

Память ($H > 0{,}5$) рождается на первом кумулятивном уровне — там, где материальный след впервые связывает случайности. Направленность ($TE > 0$) рождается там же — кумулятивность по определению направлена снизу вверх (10). Вместе они дают объективную связность (3.7) — физическую основу причинности.

Предварительные результаты недавних исследований указывают на то, что добавление памяти к хаотическим системам ломает классическую универсальность Фейгенбаума и создаёт новый класс хаоса с дробным скейлингом [36]. Память — фактор, фундаментально меняющий природу хаоса. Это подтверждает центральный тезис ППС: немарковость — не поправка, а суть потока.

Пример: трещина в стекле. На уровне 1 (вакуум) $\psi \approx 0{,}5$ — флуктуации независимы. На уровне 5 (вакансии) ψ уже выше 0,5 — каждая вакансия помнит о предыдущих через деформацию решётки. На уровне 8 (макротрещина) $\psi \approx 0{,}8$ — сильная память, сильная кластеризация. D за тот же путь упал с «много типов флуктуаций» до ≈ 3–5 типов дефектов. Пирамида уровней преобразовала случайность независимых флуктуаций в причинную цепь.

3.6. Недостижимость полюсов

Параметры ψ и D определяют границы потока. Полюса $\psi = 0$ и $\psi = 1$ физически недостижимы.

В середине диапазона ψ и D независимы: можно иметь регулярный поток разных типов или кластеризованный поток одинаковых. К полюсам ведут конкретные пути, и все они заблокированы.

3.6.1. Полюс $\psi = 0$: исчезновение кластеризации

К полюсу $\psi = 0$ ведут два пути, и оба заблокированы.

Путь 1: $D \to \infty$ — бесконечное разнообразие. Если каждый след уникален, кластеризоваться нечему: ни один не похож на предыдущий, и материальный носитель не успевает удержать след — каждый следующий удар нового типа стирает предыдущий, не успев закрепиться. Этот путь заблокирован: $D \to \infty$ физически невозможно, потому что материальный носитель имеет структуру, ограничивающую число типов.

Путь 2: идеальная регулярность при $D = 1$. Все следы одного типа, идут как метроном. Этот путь заблокирован: квантовая природа [1] всегда даёт более одного типа флуктуаций.

Дополнительное обоснование — принцип неопределённости Гейзенберга [1] и третье начало термодинамики [31]: абсолютный нуль температуры физически недостижим, а при любой ненулевой температуре тепловые флуктуации неустранимы. Теорема о флуктуационно-диссипационной связи [30] дополняет этот аргумент для равновесных систем с диссипацией: флуктуации и диссипация — две стороны одного процесса, и ни одна неустранима, пока есть другая. Неучтённый остаток — это не логическая неполнота, а физическая неизбежность: квантовая природа материи всегда даёт более одного типа флуктуаций.

3.6.2. Полюс $\psi = 1$: предельная кластеризация

Два сценария ведут к этому полюсу — и оба упираются в физическое ограничение.

Путь 1: $D = 1$ — нулевое разнообразие. Все следы одного типа и ссыпаются в один кластер. Память максимальна — но ей нечего связывать. Этот путь заблокирован: квантовая природа не позволяет свести всё к одному типу.

Путь 2: коллапс разных типов в один кластер. Одновременность всех событий физически невозможна: каждое событие имеет конечную длительность и происходит в конкретной точке пространства-времени (закон локальности, раздел 2.3).

Дополнительное обоснование — закон необходимого разнообразия Эшби [32]: разнообразие целого должно быть не меньше разнообразия среды.

3.6.3. $\psi = 0{,}5$: чистая случайность (пуассоновский процесс)

В отличие от полюсов, этот режим достижим. Примеры: радиоактивный распад, тепловой шум, идеальный игральный кубик. При $\psi = 0{,}5$ поток не имеет памяти ($H = 0{,}5$), не имеет направленных связей ($TE = 0$), и события распределены по закону Пуассона. Это марковский предел — состояние, в котором след не накапливается [33].

Марковский предел — это ровно одна точка на шкале потока: $\psi = 0{,}5$, $H = 0{,}5$. Не диапазон, а точное значение — если иметь в виду пуассоновский процесс, наиболее важный случай марковского предела. Строго говоря, марковский процесс — любой процесс без памяти ($K = 0$), и существуют регулярные марковские процессы с $\psi < 0{,}5$. Но именно пуассоновский случай соответствует равномерному потоку независимых событий — радиоактивный распад, тепловой шум, игральный кубик. Немарковский процесс — общий случай: он занимает всю шкалу от $\psi \to 0$ до $\psi \to 1$, кроме этой точки. Марковский процесс — вырожденный частный случай: одно значение из континуума.

3.6.4. Область существования потока

Оба полюса убивают способность потока создавать целые, но с разных сторон:

- $\psi \to 0$ — нет связи. Следы идут, но не соединяются.
- $\psi \to 1$ — нет разнообразия. Следы соединены, но им нечем отличаться друг от друга.

Поток существует между полюсами — там, где памяти достаточно, чтобы связать следы, а разнообразия достаточно, чтобы было из чего строить. Закон совпадений (16) работает именно здесь.

Таблица 3. Полная шкала потока

$\psi \to 0$	$0 < \psi < 0{,}5$	$\psi = 0{,}5$	$0{,}5 < \psi < 1$	$\psi \to 1$
полюс недостижим	область существования	точка достижима	область существования	полюс недостижим
потока нет	поток работает	поток в ней вырожден	поток работает	потока нет

Недостижимость полюсов означает, что на любом уровне иерархии поток всегда находится между чистым порядком и чистой случайностью. Это фундаментальное свойство материи [33].

Пример: трещина в стекле. Поток дефектов в стекле живёт в области $\psi \approx 0{,}8$, $H \approx 0{,}7$ — справа от марковского предела, в зоне персистентности. Память есть ($H > 0{,}5$), кластеризация есть ($\psi > 0{,}5$), разнообразие умеренное ($D \approx 3$–5). Трещина может расти — но не в полюсе (нет разнообразия — не из чего строить) и не в другом полюсе (нет связи — дефекты не соединяются). Существование потока — между.

3.7. Объективная связность потока

Законы потока и четыре меры подводят к важному выводу: поток не хаотичен в смысле «белого шума». Между событиями в потоке существует объективная связность — физическая реальность, не зависящая от какого-либо наблюдателя.

В чистом белом шуме каждое состояние системы статистически независимо от предыдущего. Марковский процесс «забывает» историю [20]. В реальном потоке случайностей действуют физические ограничения: законы сохранения энергии, импульса, заряда. Эти законы не позволяют состоянию системы «исчезнуть» бесследно. Прошлые состояния материально «впечатываются» в текущую конфигурацию через следы, создавая память [33].

Уравнение Мори–Цванцига (2), подробно рассмотренное в разделе 2.4, объединяет всё, что было сказано о потоке качественно:

• Кумулятивность (раздел 3.4.4) — накопление, описываемое интегралом памяти.

• Материальный след (раздел 2.3) — ядро K, материально связывающее прошлое с настоящим.

• Немарковость (раздел 2.4) — зависимость будущего от всей истории, а не только от текущего состояния.

• Масштабирование числа случайностей (формула 5) — сохранение «вещества случайности» через ядро.

Два строгих критерия объективной связности:

1. Долговременная память: H > 0,5 [23]. Показатель Хёрста выше 0,5 указывает на персистентность — систему с «инерцией» или самоусилением.

2. Направленный поток: $TE > 0$ [26]. Передаточная энтропия строго доказывает асимметрию: знание прошлого процесса X уменьшает неопределённость будущего процесса Y сверх того, что даёт знание прошлого самого Y.

Вместе эти два критерия дают объективную связность — физическую основу причинности. Память ($H > 0{,}5$) — необходимое условие: прошлое влияет на будущее. Направленность ($TE > 0$) — достаточное дополнение: влияние идёт в одну сторону. Память без направленности — два независимых процесса с внутренними трендами, но без связи. Память с направленностью — причинная цепь.

Объективная связность существует в потоке как физическая реальность. Она — прямое следствие немарковской природы потока, которая, в свою очередь, вытекает из материальности случайности и кумулятивности [33]. Связность не создаётся измерением — она существует в самой материи.

Пример: трещина в стекле. Два критерия выполнены: $H \approx 0{,}7 > 0{,}5$ (персистентность — трещина «помнит» свой путь), $TE > 0$ (направление от микротрещин к макротрещине). Связность существует физически — в виде деформированной решётки, напряжённого состояния, накопленных дефектов — независимо от того, измеряет ли кто-нибудь акустическую эмиссию.

3.8. Свойства потока

Поток наследует свойства своих элементов, но добавляет системные качества:

• Локальность — следы возникают в конкретных точках пространства-времени и в конкретном состоянии объекта.

• Иерархичность — поток организован по уровням, передача идёт снизу вверх.

• Материальность — всегда есть материальный носитель следа.

• Неустранимость — поток нельзя полностью остановить; он всегда существует как следствие квантовой природы материи.

• Стохастичность — индивидуальные события непредсказуемы.

• Кумулятивность — малые следы накапливаются, ведя к макроскопическим последствиям.

• Память (немарковость) — каждая следующая случайность реализуется в системе, уже изменённой предыдущими следами. Кумулятивность — механизм накопления, память — его следствие.

• Разнообразие — поток на данном уровне содержит конечное число типов следов.

4. ПРОВЕРКА, ИЗМЕРЕНИЯ.

4.1. Соответствие законам физики

Каждый закон потока имеет прямой физический аналог:

Таблица 4

Закон потока	Физический аналог
Масштабирование числа случайностей	Уравнение непрерывности [2, 3]
Статистическая предсказуемость	Статистическая физика [3]
Масштабная инвариантность	Причинность, иерархия масштабов
Направленность потока	Принцип причинности
Трансформация материальности	Законы сохранения, единство материи
Кумулятивность	Самоорганизованная критичность [7]
Пороговая активация	Теория нуклеации, фазовые переходы [9]
Закон совпадений	Резонансы в квантовой механике

Количественные меры и их физические аналоги:

Таблица 5

Свойство потока	Физический аналог
Показатель Хёрста H	R/S-анализ, DFA [23, 24]
Передаточная энтропия TE	Теория информации [26]
Уравнение Мори–Цванцига	Неравновесная статистическая механика [27, 28]
Параметр ψ	Индекс дисперсии Фано [25, 8]
Параметр D	Индекс Симпсона, закон Эшби [32]

Фундаментальные законы, которым подчиняется поток:

• Закон сохранения энергии — через закон сохранения веса и материальность.

• Второе начало термодинамики — через направленность потока и рост энтропии как меры конечного состояния. Энтропия характеризует результат деструктивного действия потока, а не сам поток и не случайность.

• Принцип причинности — через закон направленности.

• Локальность взаимодействий — через локальность следов.

• Квантовый принцип неопределённости — как источник первичных случайностей [1].

• Немарковская природа процессов с памятью — через кумулятивность, материальный след и иерархическую передачу [21, 22, 33]. Марковский процесс — предельный случай, когда следами можно пренебречь [20]. В реальных целых пренебречь памятью нельзя: каждая случайность оставляет след, и следующая реализуется в уже изменённой системе [33].

• Нарушение эргодичности — через накопление следов: временное среднее не равно ансамблевому в системах с памятью. Классическая статистическая механика — предельный случай, работающий только в эргодических системах без памяти.

• ППС и теория надёжности. Теория надёжности решает часть задачи: накопление дефектов, статистический прогноз отказа (Weibull, MTBF), усталость материалов. ППС не отменяет теорию надёжности — она расширяет её. Теория надёжности работает с ансамблем (1000 деталей → распределение отказов), на одном уровне, с одной мерой ($\lambda(t)$), и описывает только деградацию. ППС работает с траекторией конкретного носителя (эргодичность нарушена), на иерархии уровней от квантового до макро, с четырьмя мерами (ψ, H, TE, D), и описывает одновременно деградацию и рождение нового. Теория надёжности — это тюхэ для инженерии: статистика отказов, усреднение по ансамблю. ППС — автоматон для физики: траектория следов, иерархия, память.

4.2. Фальсифицируемость

Для каждого закона можно указать конкретное условие, при котором он был бы опровергнут:

Таблица 6

Закон	Условие фальсификации
Масштабирование числа случайностей	Траектория $N(t)$ не зависит от предыстории (память отсутствует)
Статистическая предсказуемость	Статистика потока принципиально непредсказуема даже в среднем
Масштабная инвариантность	Нарушение степенной зависимости между плотностью и масштабом [35]
Направленность потока	Устойчивый поток влияния сверху вниз без разрушения целых [35]
Трансформация материальности	Случайность полностью теряет материальность при переходе
Кумулятивность	Крупное событие без накопления малых (мгновенно)
Пороговая активация	Рождение целых в среде без локальных неоднородностей [34]
Закон совпадений	Рождение целого при отсутствии одного из трёх факторов [34]
Немарковость	Поведение системы одинаково независимо от истории [33]
Неэргодичность	Временное среднее равно ансамблевому для системы с накопленными следами

Ни одно из этих условий пока не наблюдалось.

4.3. Экспериментальные подтверждения

Прямые подтверждения:

• Лэмбовский сдвиг [5] — смещение энергетических уровней атома водорода под влиянием флуктуаций вакуума. Подтверждает первичность квантовых случайностей (раздел 2.2).

• Эффект Казимира [5] — притяжение незаряженных пластин за счёт флуктуаций вакуума. Подтверждает материальность и измеримость следов (раздел 2.3).

• Диффузия дефектов в кристаллах: измеримы J_{in}, J_{out}, выполняется уравнение непрерывности (6).

• Кристаллизация из растворов: роль порога ρ_{crit} и критических зон [34].

• Зарождение пузырьков в перегретой жидкости: пороговая активация [34].

• Образование планет в протопланетном диске: иерархическая передача [34].

• Звёздный нуклеосинтез: пороговые реакции, синхронность условий [34].

• Распределение астероидов по размерам: масштабная инвариантность (раздел 3.4.1).

• Измерение H для сейсмических каталогов [23]: H > 0,5 подтверждает персистентность.

• Измерение TE в турбулентных потоках [26]: TE > 0 подтверждает направленность каскада.

• Измерение ψ для радиоактивного распада: $\psi \approx 0{,}5$ подтверждает достижимость пуассоновского предела.

Косвенные подтверждения:

• Броуновское движение: реальность флуктуаций, материальность следов.

• Радиоактивный распад: статистическая предсказуемость при индивидуальной непредсказуемости.

• Землетрясения (закон Гутенберга–Рихтера) [11]: степенное распределение, подтверждающее масштабную инвариантность и кумулятивность [33].

• Турбулентность: иерархическая передача возмущений, закон Колмогорова [6].

• Модель песчаной кучи Пер Бака [7]: кумулятивность, пороги, степенные законы [33].

• Излучение Хокинга [14] — теоретическое предсказание, согласующееся с ППС.

• Гиперболические распределения в биологии, социологии, лингвистике [40, 41, 42]: подтверждение немарковской природы процессов с памятью.

• Неэргодичность в случайном блуждании, аномальной диффузии, биологических системах: временное среднее не равно ансамблевому — подтверждение того, что системы с памятью требуют траекторий, а не распределений.

• Статистика Цаллиса: неэкстенсивность ($q \neq 1$) в системах с немарковской эволюцией — подтверждение, что классическая статистика Больцмана–Гиббса — частный случай.

4.4. Сквозной пример: рост трещины в стекле — итог

Проследим один процесс через все формулы книги — от квантовой флуктуации до макроскопического разрушения.

Уровень 1–2. Источник (формула 1). В объёме $V \sim 10^{-45}$ м^3 квантовая флуктуация вакуума рождает виртуальную пару. Это первичная случайность — самопроизвольная, материальная, локальная. $D > 1$. $\psi \approx 0{,}5$ — марковский предел, память ещё не накоплена.

Уровень 3–5. Накопление (формулы 5, 9, 12). В решётке стекла миллиарды флуктуаций накапливаются за годы. Каждая оставляет след. Число случайностей меняется по траектории: $dN/dt = f(N, V, \int K \cdot N\, ds)$. Память растёт: $H \approx 0{,}7 > 0{,}5$. Кластеризация нарастает: $\psi \approx 0{,}8 > 0{,}5$. D падает: от «много типов флуктуаций» до ≈ 3–5 типов дефектов. Эргодичность нарушена: временное среднее не равно ансамблевому — стекло стареет по своей траектории, не по ансамблю.

Уровень 6–7. Порог (формула 15). В локальной зоне плотность следов ρ_{loc} достигает критической ρ_{crit}. Функция Хэвисайда переключается: $\Theta = 1$. Критическая зона готова — но трещины ещё нет.

Уровень 8. Рождение (формула 16). В критической зоне сходятся три фактора: зона (порог достигнут), материал ($D \approx 3$–5), энергия ($E_{bind} \geq E_{crit}$). $\Phi = 1$. Рождается макроскопическая трещина.

Измерение (формулы 17–21). Для каталога акустической эмиссии: $H \approx 0{,}7$, $\psi \approx 0{,}8$, $TE > 0$, $D \approx 3$–5. Полный профиль потока — как отпечаток пальца.

Уравнение (2). Ядро памяти $K \neq 0$ — рост трещины зависит от всей предыстории накопления следов, а не только от текущего напряжения.

След растёт от вакансии (10^{-27} м^3) до трещины (10^{-9} м^3) — на 18 порядков. От вакансии до вмятины на автомобиле — на 27 порядков. Это и есть поток: след, растущий по масштабам. Один процесс — от флуктуации вакуума до трещины, которую видно глазом. Все формулы книги описывают его на разных уровнях.

4.5. Что требует уточнения

• Мера ρ_{loc} (локальная плотность следов в критической зоне) — нет строгого определения через микроскопические параметры [34].

• Оператор O_n — требуется явный вид для разных уровней иерархии [33].

• Функция совпадения Φ — нужна параметризация для конкретных типов целых [34].

• Сечение захвата σ — как зависит от свойств целого и потока [34].

• Связь J_{local} с макроскопическими параметрами [33].

• Ядро памяти $K(t-s)$ в уравнении Мори–Цванцига — требуется явный вид для конкретных физических систем [33]. Ядро K можно получить тремя путями: (1) из микроскопической динамики — проекционная техника Мори: $K(t-s) = \langle \xi(t)\xi(s) \rangle / \langle X^2 \rangle$, автокорреляция исключённых степеней свободы; (2) из экспериментальной траектории — через автокорреляцию $C(\tau)$ и уравнение Винера–Хопфа, или через показатель Хёрста ($H = 1 - \alpha/2$ при $K(\tau) \sim \tau^{-\alpha}$), или прямую подгонку обобщённого уравнения Ланжевена; (3) из структуры носителя — пространственная корреляция дефектов, функция парной корреляции g(r), измерение радиуса влияния следа. В ППС K — не математическая абстракция, а физическое свойство: как накопленные материальные следы меняют вероятности будущих событий. Четыре меры (ψ, H, TE, D) — источник данных, из которых K восстанавливается.

• Связь ψ с микроскопическими параметрами потока [33].

• Связь D с микроскопическими параметрами потока [33].

• Зависимость ψ и D от уровня n — количественная форма ψ-градиента иерархии [33].

• Параметр неэкстенсивности q Цаллиса — количественная связь с параметром памяти H и ядром K.

• Соотношение P_{birth} и J_{birth} — задача дальнейшей работы.

ГЛОССАРИЙ

Автоматон — В античной философии — самопроизвольность природы, событие, возникающее без цели и замысла. В ППС — категория случайности внутри потока, начиная с уровня частиц. Обладает пятью свойствами: самопроизвольность, материальность, локальность, память, разнообразие. Вакуумная флуктуация не является автоматоном: она — исток потока, не входящий в иерархию уровней. На уровне вакуума нет памяти и разнообразия — они появляются на следующих уровнях, где следы накапливаются и связывают случайности.

Антиперсистентность — Режим потока при $H < 0{,}5$: тенденция сменяется на противоположную.

Вес случайности — Величина $W = N_n \bullet V_n$. Траекторная, не статистическая величина. Меняется со временем по уравнению траектории. Размерность — [м^3].

Дисперсия Фано — Отношение $R = \sigma^2 / \mu$. Используется для вычисления параметра ψ (формула 17).

Кластеризация — Свойство потока, при котором события группируются во времени. Измеряется параметром ψ (формула 18).

Критическая зона — Состояние потока, в котором накопление следов превысило порог ρ_{crit}.

Кумулятивность — Свойство потока, при котором множество мелких следов нижнего уровня накапливаются во времени, чтобы породить одно дискретное событие верхнего уровня. Описывается формулами (12)–(14).

Марковский процесс — Процесс без памяти: каждый шаг зависит только от текущего состояния, история забывается. Предельный случай потока при $K = 0$, $H = 0{,}5$, $\psi = 0{,}5$. Пример: радиоактивный распад.

Мера потока — Количественная характеристика потока. Четыре меры: ψ (кластеризация), H (память), TE (направленность), D (разнообразие).

Накопленный вес — Величина $W_n(T) = \langle N_n \rangle \cdot V_n \cdot T = C \cdot T$ — вес следов, накопленных за время T. Размерность — [м^3•с].

Немарковский процесс — Процесс с памятью: будущее зависит от всей предыстории, а не только от текущего состояния. Общий случай потока. Описывается уравнением Мори–Цванцига (2) с ядром памяти $K \neq 0$.

Неэргодичность — Нарушение равенства временного и ансамблевого средних. Возникает в системах, накапливающих следы (немарковских). В неэргодичных системах ансамблевые распределения не заменяют конкретную траекторию.

Объективная связность — Физическая реальность, не зависящая от наблюдателя: между событиями в потоке существует связь, обусловленная материальным следом. Критерии: $H > 0{,}5$ (память) и $TE > 0$ (направленность).

Персистентность — Режим потока при $H > 0{,}5$: тенденция сохраняется, память накапливается.

Показатель Хёрста — Мера долговременной зависимости между следами. Вычисляется через R/S-анализ или DFA (формула 20). $H = 0{,}5$ — марковский предел; $H > 0{,}5$ — персистентность; $H < 0{,}5$ — антиперсистентность.

Пороговая активация — Свойство потока, при котором вероятность рождения нового целого отлична от нуля только при превышении локального порога ρ_{crit}. Описывается формулой (15).

Поток случайностей — Упорядоченная во времени последовательность случайностей, связанных через следы. Иерархическая структура, исток которой — квантовый вакуум, не входящий в поток. Первый уровень потока — частицы.

Передаточная энтропия — Мера асимметрии влияния между двумя потоками. Введена Т. Шрайбером [26]. $TE = 0$ — потоки независимы; $TE > 0$ — есть направленный поток.

$\mathbf{P_{birth}}$ — Вероятность (относительная интенсивность) рождения нового целого в критической зоне. Определяется пороговой активацией (15) и синхронностью трёх факторов (16).

Разнообразие — Мера количества различных типов следов на данном уровне иерархии. Измеряется параметром D (формула 3). Нормализованная форма — δ (формула 4).

Самопроизвольность — Свойство случайности: возникновение без внешней причины, из квантовой природы материи. Физическая основа — принцип неопределённости Гейзенберга (1).

След — Материальный результат контакта, вызванного случайностью. Конкретное изменение в носителе. Обладает идентичностью, необратимостью, накапливаемостью. След растёт пропорционально масштабу носителя: от вакансии в решётке (10^{-27} м^3) до вмятины на автомобиле (~1 м^3) — на 27 порядков. След — единственный способ

регистрации автоматона: мы не видим самопроизвольность в момент события, но видим её материальный результат. След связывает случайность с памятью, поток — с историей. Без следа информация невозможна.

Случайность — Материально обусловленный контакт, в котором одна структура оставляет след в другой. Первичный контакт происходит на квантовом уровне вакуума. Первичная категория ППС. В потоке — начиная с уровня частиц — характеризуется пятью свойствами: самопроизвольность, материальность, локальность, память, разнообразие. Вакуумная флуктуация — исток — обладает только первыми тремя.

Тюхэ — В античной философии — случай, пересечение причинных цепей, каждая из которых имеет основание, но их встреча не имеет общей причины. В ППС — историческая редукция случайности, из которой вычли самопроизвольность, материальность, память и разнообразие.

Уравнение Мори–Цванцига — Обобщённое уравнение Ланжевена (2), описывающее немарковский процесс с памятью. Ядро памяти K(t−s) связывает прошлое с настоящим. При $K = 0$ сводится к марковскому пределу.

Флуктуация вакуума — Кратковременное изменение состояния поля в квантовом вакууме. Первичный источник случайностей. Не является автоматоном: вакуум — источник, а не часть потока.

Энтропия — Мера неупорядоченности, равномерности распределения [3]. Характеризует результат деструктивного действия потока — вырождение, рассеяние, тепло. Не является мерой развития в ППС. Классическая энтропия Больцмана–Гиббса — частный случай энтропии Цаллиса при q = 1.

Эргодичность — Свойство системы, при котором временное среднее равно ансамблевому. В системах с памятью (накапливающих следы) эргодичность нарушается — но не всегда и не сразу: это переход, а не бинарное свойство. Классическая статистическая механика работает только в эргодических системах.

Ядро памяти — Функция K(t−s) в уравнении Мори–Цванцига (2), описывающая влияние прошлых состояний на текущее. Если $K \neq 0$, процесс немарковский.

БИБЛИОГРАФИЯ

Фундаментальная физика

[1] Heisenberg W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik // Zeitschrift für Physik. 1927. Bd. 43. S. 172–198.

[2] Landau L. D., Lifshitz E. M. Fluid Mechanics. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1987.

[3] Landau L. D., Lifshitz E. M. Statistical Physics. 3rd ed. Oxford: Pergamon Press, 1980.

[4] Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M. The Feynman Lectures on Physics. Reading, MA: Addison-Wesley, 1964.

[5] Lamb W. E., Retherford R. C. Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method // Physical Review. 1947. Vol. 72. P. 241–243. (Casimir H. B. G. On the Attraction Between Two Perfectly Conducting Plates // Proc. K. Ned. Akad. Wet. 1948. Vol. 51. P. 793–795.)

Сложные системы и турбулентность

[6] Kolmogorov A. N. The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers // Doklady Akademii Nauk SSSR. 1941. Vol. 30. P. 301–305.

[7] Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-Organized Criticality: An Explanation of the 1/f Noise // Physical Review Letters. 1987. Vol. 59. P. 381–384.

[8] Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. New York: W. H. Freeman, 1982.

Фазовые переходы и катастрофы
[9] Landau L. D., Lifshitz E. M. Statistical Physics, Part 1. Ch. XIV: Phase Transitions. 3rd ed. Oxford: Pergamon Press, 1980.
[10] Thom R. Structural Stability and Morphogenesis. Reading, MA: Benjamin, 1972.
[11] Gutenberg B., Richter C. F. Frequency of Earthquakes in California // Bulletin of the Seismological Society of America. 1944. Vol. 34. P. 185–188.
[12] Zeeman E. C. Catastrophe Theory: Selected Papers 1972–1977. Reading, MA: Addison-Wesley, 1977.

Космология и чёрные дыры
[13] Hawking S. W., Ellis G. F. R. The Large Scale Structure of Space-Time. Cambridge: Cambridge University Press, 1973.
[14] Hawking S. W. Black Hole Explosions? // Nature. 1974. Vol. 248. P. 30–31.
[15] Bethe H. A. The Electromagnetic Shift of Energy Levels // Physical Review. 1947. Vol. 72. P. 339–341.

Теория вероятностей и случайные процессы
[16] Feller W. An Introduction to Probability Theory and Its Applications. 2nd ed. New York: Wiley, 1971.
[17] Gnedenko B. V., Kolmogorov A. N. Limit Distributions for Sums of Independent Random Variables. Cambridge, MA: Addison-Wesley, 1954.
[18] Shiryaev A. N. Probability. 2nd ed. New York: Springer, 1995.
[19] Doob J. L. Stochastic Processes. New York: Wiley, 1953.

Марковские и немарковские процессы
[20] Markov A. A. Extension of the Limit Theorems of Probability Theory to a Sum of Variables Connected in a Chain // Известия физико-математического общества при Казанском университете. 1906.
[21] van Kampen N. G. Stochastic Processes in Physics and Chemistry. 3rd ed. Amsterdam: North-Holland, 2007.
[22] Zwanzig R. Nonequilibrium Statistical Mechanics. Oxford: Oxford University Press, 2001.

Долговременная память и фракталы
[23] Hurst H. E. Long-Term Storage Capacity of Reservoirs // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1951. Vol. 116. P. 770–808.
[24] Peng C.-K., Buldyrev S. V., Havlin S., Simons M., Stanley H. E., Goldberger A. L. Mosaic Organization of DNA Nucleotides // Physical Review E. 1994. Vol. 49. P. 1685–1689.

Кластеризация и дисперсия
[25] Fano U. Ionization Yield of Radiations. II. The Fluctuations of the Number of Ions // Physical Review. 1947. Vol. 72. P. 26–29.

Передача информации
[26] Schreiber T. Measuring Information Transfer // Physical Review Letters. 2000. Vol. 85. P. 461–464.

Уравнения с памятью
[27] Zwanzig R. Ensemble Method in the Theory of Irreversibility // Journal of Chemical Physics. 1960. Vol. 33. P. 1338–1341.

[28] Mori H. Transport, Collective Motion, and Brownian Motion // Progress of Theoretical Physics. 1965. Vol. 33. P. 423–455.
[29] Nakajima S. On Quantum Theory of Transport Phenomena // Progress of Theoretical Physics. 1958. Vol. 20. P. 948–959.

Физические пределы

[30] Kubo R. The Fluctuation-Dissipation Theorem // Reports on Progress in Physics. 1966. Vol. 29. P. 255–284.
[31] Nernst W. Thermodynamik und spezifische Wärme // Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften. 1912. S. 134–140.

Кибернетика

[32] Ashby W. R. An Introduction to Cybernetics. London: Chapman & Hall, 1956.

Парадигма Потока Случайностей

[33] Никитин А. В. Парадигма потока случайностей 1 // «Академия Тринитаризма», М., Эл № 77-6567, публ. 29912, 03.03.2026.
[34] Никитин А. В. Парадигма потока случайностей 2 // «Академия Тринитаризма», М., Эл № 77-6567, публ. 29920, 09.03.2026.
[35] Никитин А. В. Парадигма потока случайностей 3 // «Академия Тринитаризма», М., Эл № 77-6567, публ. 29928, 16.03.2026.

Немарковский хаос

[36] Vijayan A. et al. Universality Classes of Chaos in Non-Markovian Dynamics. arXiv:2512.22445, 2025.

Энтропия и разнообразие

[37] Grandy W. T. Jr. Entropy and the Time Evolution of Macroscopic Systems. Oxford: Oxford University Press, 2008.
[38] Prokopenko M., Boschetti F., Ryan A. An Information-Theoretic Primer for Self-Organization. arXiv:1808.05602, 2018.
[39] Jost L. Entropy and Diversity // Oikos. 2006. Vol. 113. P. 363–375.

Немарковская парадигма

[40] Азроянц Э. А., Харитонов А. С., Шелепин Л. А. Немарковские процессы как новая парадигма // Вопросы философии. 1999. № 7. С. 94–104.
[41] Харитонов А. С., Шелепин Л. А. Равновесные распределения в теории немарковских процессов // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1996. № 7–8. С. 79–83.

Алеатика

[42] Чайковский Ю. В. Эволюция. М.: Центр системных исследований, 2003.

Хаос

[43] Feigenbaum M. J. Quantitative Universality for a Class of Nonlinear Transformations // Journal of Statistical Physics. 1978. Vol. 19. P. 25–52.

Алгоритмическая теория случайности

[44] Kolmogorov A. N. Three Approaches to the Definition of the Quantity of Information // Problemy Peredachi Informatsii. 1965. Vol. 1. P. 3–11.

Детерминированный хаос
[45] Strogatz S. H. Nonlinear Dynamics and Chaos. 2nd ed. Boulder, CO: Westview Press, 2015.

Неэкстенсивная статистика
[46] Tsallis C. Possible Generalization of Boltzmann-Gibbs Statistics // Journal of Statistical Physics. 1988. Vol. 52. P. 479–487.

Неэргодичность
[47] Bouchaud J.-P., Potters M. Theory of Financial Risk and Derivative Pricing. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
[48] Metzler R., Klafter J. The Restaurant at the End of the Random Walk // Journal of Physics A. 2004. Vol. 37. P. R161–R208.

Скрытые переменные
[49] Bell J. S. On the Einstein Podolsky Rosen Paradox // Physics. 1964. Vol. 1. P. 195–200.
[50] Aspect A., Grangier P., Roger G. Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem // Physical Review Letters. 1981. Vol. 47. P. 460–463.